



Investigação experimental e analítica no reforço
ao corte de vigas de betão armado com a
técnica da inserção de laminados de CFRP

Salvador José Esteves Dias

UMinho|2008



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Salvador José Esteves Dias

Investigação experimental e analítica no reforço
ao corte de vigas de betão armado com a
técnica da inserção de laminados de CFRP

Julho de 2008



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Salvador José Esteves Dias

**Investigação experimental e analítica no reforço
ao corte de vigas de betão armado com a
técnica da inserção de laminados de CFRP**

Tese de Doutoramento em Engenharia Civil
Área de Conhecimento em Estruturas

Trabalho efectuado sob a orientação de
Professor Doutor Joaquim António Oliveira de Barros

Julho de 2008

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE
APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO
ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Agradecimentos

Com a conclusão deste trabalho, desejo expressar o meu “muito obrigado” às pessoas e entidades que contribuíram positivamente para a sua realização e consequentemente para a satisfação dos objectivos propostos.

Ao Professor Joaquim Barros, sob cuja orientação decorreu a realização da presente dissertação, quero expressar o meu profundo agradecimento pelos seus ensinamentos, disponibilidade, orientação e incentivos sempre permanentes.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho agradeço o contínuo interesse pelo desenrolar do trabalho desenvolvido.

Ao António Matos e Marco Jorge manifesto a minha gratidão pela colaboração e apoio na execução do trabalho experimental realizado. Neste sentido não poderia deixar de agradecer as colaborações do José Gonçalves, José Manuel, Carlos Jesus, Carlos Palha, Rui Oliveira, Paulo Caetano e Fernando Pokee.

Ao Miguel Freitas o meu profundo agradecimento pela ajuda prestada quer na parte experimental do trabalho como na parte da composição de algumas figuras da tese. Um agradecimento especial às colaborações do Vincenzo Bianco, João Lima e Luis Ramos.

À empresa Casais o meu reconhecimento e agradecimento pelo imprescindível apoio prestado na concepção dos modelos de vigas de betão armado e na execução dos reforços. De igual modo, apresento os meus agradecimentos pelo contributo extraordinário prestado pela empresa S&P Reinforcement no fornecimento dos sistemas compósitos de reforço, pela empresa Degussa no fornecimento das resinas para aplicação dos reforços de CFRP e pela empresa UNIBETÃO (Central de Braga) no fornecimento do betão. Ao CEMACON (INEGI/FEUP) e à Fibersensing agradeço a preciosa colaboração prestada na execução dos ensaios de tracção uniaxial com provetes de laminado de CFRP.

É meu dever salientar a importância do apoio financeiro prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no projecto POCTI/ECM/59033/2004 de título “Análise do desempenho de uma nova técnica de reforço estrutural com FRP recorrendo a um sistema integrado baseado em sensores de fibra óptica”.

Um agradecimento muito especial à Luísa, a minha namorada, por me ter proporcionado o tempo e o apoio imprescindível para a realização deste trabalho. Neste âmbito não poderia deixar de agradecer o apoio permanente da minha irmã Didi e do meu cunhado Leonel.

Por fim, pela forma insuperável como me acompanharam e ajudaram apresento um agradecimento enorme àqueles a quem dedico este trabalho: os meus pais.

Resumo

O presente trabalho diz respeito à investigação efectuada sobre a aplicação, no reforço ao corte de vigas de betão armado, da técnica que se baseia na inserção de laminados de CFRP (Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono) em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. Os aspectos essenciais associados à execução da técnica de reforço proposta, a verificação experimental da sua eficácia e a definição de uma formulação analítica, que proporcione a quantificação da contribuição do CFRP para a resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado, foram objecto de desenvolvimento nesta dissertação.

Este trabalho é iniciado com uma revisão bibliográfica sobre o estado do conhecimento actual no que diz respeito à utilização de materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão, com particular destaque para o reforço ao corte.

A investigação experimental efectuada é apresentada em duas partes, de acordo com o faseamento com que foi executada. Na primeira, descrevem-se os ensaios realizados com o objectivo fundamental de validação da técnica de reforço proposta. O comportamento de vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos é comparado com o de vigas reforçadas com outras técnicas de incrementar a capacidade resistente ao esforço transversal, com e sem o recurso a materiais compósitos de CFRP. Na segunda parte descrevem-se os ensaios realizados com quatro séries de vigas de betão armado, os quais foram concebidos e executados para avaliar o efeito que os seguintes parâmetros têm na eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo: percentagem e orientação dos laminados de CFRP; percentagem de armadura transversal existente; classe de resistência do betão; relação entre o vão de corte e a altura útil da secção transversal. A experiência adquirida na aplicação de laminados de CFRP às vigas ensaiadas permitiu que fossem definidos os aspectos essenciais associados à execução da técnica de reforço, nos quais se inclui o conjunto de procedimentos a serem adoptados para que seja garantida a qualidade necessária na aplicação do reforço de CFRP.

Tendo por base os resultados obtidos na investigação experimental efectuada, foi estabelecida uma formulação analítica que conduz à determinação do valor expectável da contribuição, conferida por uma determinada solução de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos, para a resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado.

Finalmente, os principais ensinamentos adquiridos na investigação desenvolvida ao longo deste trabalho são salientados, sendo apontadas perspectivas de desenvolvimento futuro.

Abstract

This work deals with the research carry out on the shear strengthening of Reinforced Concrete (RC) beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) laminates applied according to the Near Surface Mounted (NSM) technique. NSM is based on introducing CFRP laminates into slits opened on the concrete cover of the lateral faces of the beam. The definition of the basic aspects about the CFRP application using NSM technique, the experimental assessment of the effectiveness of this technique and the development of an analytical formulation for the prediction of the contribution of the CFRP laminates for the shear resistance of RC beams are research tasks covered in this document.

This work starts with the state-of-art on the use of CFRP materials for the strengthening of concrete structures, having been given special attention on the shear strengthening.

The presentation of the experimental research is divided in two phases, according to the moment in time it was done. The first part consists of the description of the tests carried out to assess the potentialities of the application of NSM technique with CFRP laminates for the shear strengthening of RC beams. The behavior of beams strengthened according to this technique is compared to the behavior of beams reinforced with conventional steel stirrups and with the behavior of beams strengthened with strips of wet lay-up CFRP sheet. In the second part are described four series of tests with T cross section RC beams carried out with the purpose to evaluate the influence on the effectiveness of the NSM shear strengthening technique of the following parameters: percentage and orientation of the CFRP, percentage of existing steel stirrups, concrete strength class and the beam shear span to effective depth ratio. With the experience obtained in the application of the laminates on the tested RC beams it was possible to define the basic procedures to assure a rigorous quality control in all steps of the CFRP application.

Taking the results obtained in the experimental research, an analytical formulation to predict the contribution of the possible distinct NSM shear strengthening configurations for the shear resistance of RC beams was developed, and its performance was assessed.

Finally, the most relevant conclusions extracted from the present study are presented, and work to be developed in the future is also suggested.

Palavras chave

Keywords

PALAVRAS CHAVE

Vigas de betão armado

Reforço ao corte

Polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP)

Laminados de CFRP

Técnica da inserção de laminados de CFRP

Betão de recobrimento

Comportamento experimental

Ensaios de flexão

Modos de rotura

Formulação analítica

KEYWORDS

Reinforced concrete beams

Shear strengthening

Carbon fiber reinforced polymers (CFRP)

CFRP laminates

NSM technique

Concrete cover

Experimental behavior

Bending tests

Failure modes

Analytical formulation

Índice geral

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO / ABSTRACT	iii
PALAVRAS CHAVE / KEYWORDS	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xxi
CAPÍTULO 1 - Introdução	1.1
1.1 - Considerações gerais	1.1
1.2 - Objectivos do trabalho	1.2
1.3 - Organização da dissertação	1.4
CAPÍTULO 2 - Revisão bibliográfica	2.1
2.1 - Materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão	2.1
2.2 - Técnicas de reforço usando materiais compósitos de CFRP	2.8
2.2.1 - A técnica da colagem externa (EBR)	2.9
2.2.2 - A técnica da inserção com CFRP (NSM)	2.12
2.2.3 - Comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP (técnica NSM)	2.22
2.3 - Reforço ao corte de vigas de betão armado com CFRP	2.30
2.3.1 - Considerações gerais	2.30
2.3.2 - Aplicação da técnica da colagem externa	2.36
2.3.3 - Aplicação da técnica da inserção com varões de CFRP	2.53
2.3.4 - Proposta da técnica da inserção com laminados de CFRP	2.56
CAPÍTULO 3 - Técnica de reforço proposta e validação experimental	3.1
3.1 - A técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte	3.1
3.2 - Validação experimental da técnica de reforço proposta	3.5
3.2.1 - Concepção dos modelos	3.5
3.2.2 - Caracterização dos materiais	3.9
3.2.3 - Aplicação do reforço de CFRP	3.11
3.2.4 - Sistema de ensaio	3.13
3.2.5 - Apresentação dos resultados	3.14

3.2.5.1 - Vigas da série A com 4 ϕ 10 longitudinais	3.15
3.2.5.2 - Vigas da série A com 4 ϕ 12 longitudinais	3.19
3.2.5.3 - Vigas da série B com 4 ϕ 10 longitudinais	3.23
3.2.5.4 - Vigas da série B com 4 ϕ 12 longitudinais	3.25
3.2.6 - Análise dos resultados	3.27
3.2.6.1 - Técnica NSM com laminados CFRP vs técnica EBR com mantas de CFRP	3.28
3.2.6.2 - Reforço com CFRP vs solução convencional de betão armado com estribos de aço	3.30
3.2.6.3 - Efeito da percentagem de CFRP, da altura da viga e da percentagem de armadura longitudinal na eficácia das técnicas de reforço ao corte com CFRP	3.30
3.2.6.4 - Rendimento do CFRP vs material gasto (técnica NSM)	3.32
3.3 - Conclusões	3.33
CAPÍTULO 4 - Análise experimental da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado	4.1
4.1 - Apresentação do programa experimental	4.1
4.2 - Série A	4.5
4.2.1 - Concepção dos modelos	4.5
4.2.2 - Caracterização dos materiais	4.9
4.2.3 - Sistema de ensaio e instrumentação dos modelos	4.10
4.2.4 - Apresentação dos resultados	4.13
4.2.4.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura	4.14
4.2.4.2 - Modos de rotura	4.18
4.2.4.3 - Efeito da percentagem e da orientação do CFRP	4.21
4.2.4.4 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais	4.23
4.2.4.5 - Considerações sobre os resultados obtidos na série A	4.27
4.3 - Série B	4.29
4.3.1 - Concepção dos modelos	4.29
4.3.2 - Caracterização dos materiais	4.35
4.3.3 - Sistema de ensaio e instrumentação dos modelos	4.38
4.3.4 - Apresentação dos resultados	4.40
4.3.4.1 - Vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ no vão de corte a	4.41
4.3.4.1.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura	4.41

4.3.4.1.2 - Modos de rotura	4.46
4.3.4.1.3 - Efeito da percentagem e da orientação do CFRP	4.52
4.3.4.1.4 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais	4.53
4.3.4.2 - Vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$ no vão de corte a	4.59
4.3.4.2.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura	4.59
4.3.4.2.2 - Modos de rotura	4.62
4.3.4.2.3 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais	4.64
4.3.4.3 - Avaliação do efeito da percentagem de armadura transversal ρ_{sw}	4.65
4.3.4.4 - Considerações sobre os resultados obtidos na série B	4.69
4.4 - Série C	4.71
4.4.1 - Concepção dos modelos	4.71
4.4.2 - Caracterização dos materiais	4.74
4.4.3 - Sistema de ensaio e instrumentação dos modelos	4.75
4.4.4 - Apresentação dos resultados	4.76
4.4.4.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura	4.76
4.4.4.2 - Modos de rotura	4.81
4.4.4.3 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais	4.85
4.4.4.4 - Efeito do tipo de betão	4.88
4.4.4.5 - Considerações sobre os resultados obtidos na série C	4.90
4.5 - Série D	4.92
4.5.1 - Concepção dos modelos	4.92
4.5.2 - Caracterização dos materiais	4.96
4.5.3 - Sistema de ensaio e instrumentação dos modelos	4.97
4.5.4 - Apresentação dos resultados dos ensaios de pré-fendilhação (ensaio tipo I)	4.100
4.5.5 - Apresentação e análise dos resultados dos ensaios à rotura das vigas	4.103
4.5.5.1 - Capacidade de carga das vigas sem pré-fendilhação	4.103
4.5.5.2 - Modos de rotura das vigas sem pré-fendilhação	4.108
4.5.5.3 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais das vigas sem pré-fendilhação	4.113
4.5.5.4 - Efeito da relação entre o vão de corte a e a altura útil da secção (a/d)	4.117
4.5.5.5 - Efeito da pré-fendilhação do betão	4.120

4.5.5.6 - Considerações sobre os resultados obtidos na série D	4.128
CAPÍTULO 5 - Análise geral dos resultados experimentais do Capítulo 4	5.1
5.1 - Comportamento geral de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos	5.2
5.2 - Reforço ao corte com laminados de CFRP vs soluções alternativas para o aumento da capacidade resistente ao esforço transversal de vigas de betão armado	5.5
5.3 - Modos de rotura das vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados inseridos	5.7
5.4 - Efeito da classe de resistência do betão, da orientação e percentagem do CFRP, da percentagem de armadura transversal e da relação a/d	5.11
5.4.1 - Contribuição dos laminados de CFRP na resistência ao esforço transversal e extensão efectiva do CFRP	5.11
5.4.2 - Efeito da qualidade do betão	5.18
5.4.3 - Efeito da percentagem de estribos de aço	5.21
5.4.4 - Efeito da percentagem de CFRP	5.23
5.4.5 - Efeito da orientação do reforço de CFRP	5.26
5.4.6 - Efeito da relação a/d	5.30
5.5 - Conclusões	5.30
CAPÍTULO 6 - Formulação analítica para definir a extensão efectiva no reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos	6.1
6.1 - Estratégia para o desenvolvimento da formulação analítica	6.1
6.2 - Desenvolvimento da formulação analítica	6.2
6.3 - Validação da formulação analítica desenvolvida	6.6
6.4 - Conclusões	6.12
CAPÍTULO 7 - Considerações finais	7.1
7.1 - Conclusões gerais	7.1
7.2 - Desenvolvimentos futuros	7.6
CAPÍTULO 8 - Referências bibliográficas	8.1
ANEXO A - Pré-dimensionamento dos modelos	A.1
ANEXO B - Composição do betão e resultados de ensaios de caracterização dos materiais	B.1
ANEXO C - Informação relativa à extensometria colocada nos laminados e estribos de aço das vigas do programa experimental do Capítulo 4	C.1
ANEXO D - Sequência do ensaio de algumas vigas do programa experimental do Capítulo 4	D.1

Índice de figuras

CAPÍTULO 2 - Revisão bibliográfica

Figura 2.1 - Constituição dos materiais compósitos de FRP (Nanni, 2004)	2.3
Figura 2.2 - Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras (carbono, aramida e vidro), do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço (adaptado de ACI 440R-96 (1996))	2.4
Figura 2.3 - Materiais compósitos de CFRP (sistemas pré-fabricados: varões e laminados; sistemas curados “in situ”: mantas e tecidos)	2.5
Figura 2.4 - Vantagens da utilização dos materiais compósitos de CFRP	2.7
Figura 2.5 - Técnicas de reforço com CFRP: colagem externa (EBR) e inserção (NSM)	2.9
Figura 2.6 - Aplicação de sistemas de reforço de CFRP segundo a técnica da colagem externa (Dias, 2001)	2.10
Figura 2.7 - Aplicação da técnica da colagem externa e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias <i>et al.</i> , 2006)	2.11
Figura 2.8 - Procedimento para aplicação do reforço com laminados de CFRP inseridos (reforço à flexão)	2.13
Figura 2.9 - Elementos de CFRP utilizados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007)	2.14
Figura 2.10 - Soluções de reforço com CFRP usando a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007)	2.14
Figura 2.11 - Grau de ancoragem conferido pela técnica EBR e pela técnica NSM (adaptado de Carolin (2003)) .	2.16
Figura 2.12 - Investigação realizada na Universidade do Minho no âmbito do reforço de estruturas de betão usando a técnica NSM com laminados de CFRP	2.17
Figura 2.13 - Aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço de elementos de pilar de betão armado: inserção de seis laminados, três em cada face traccionada (dimensões em milímetros) (Ferreira, 2000) ...	2.18
Figura 2.14 - Envolvente força vs deslocamento de todos os carregamentos cíclicos no pilar P10b com 4ø10 longitudinais (SR - sem reforço; CR - com reforço) (Ferreira, 2000)	2.18
Figura 2.15 - Aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado (dimensões em milímetros) (Fortes <i>et al.</i> , 2002)	2.19
Figura 2.16 - Diagramas de carga vs deslocamento a meio vão das vigas da série S2 (Fortes <i>et al.</i> , 2002)	2.20
Figura 2.17 - Ensaio de arranque directo com laminados de CFRP inseridos (Teng <i>et al.</i> , 2006)	2.22
Figura 2.18 - Influência do comprimento de aderência (L_a) na relação força de arranque vs deslizamento: $L_a = 40$ mm, 60 mm e 80 mm (Sena-Cruz e Barros, 2002)	2.24
Figura 2.19 - Relação tensão de aderência vs deslizamento (Borchert e Zilch, 2007)	2.24
Figura 2.20 - Ensaios realizados por Rashid <i>et al.</i> (2008)	2.27
Figura 2.21 - Eficácia da técnica NSM vs EBR e influência da distância entre laminados adjacentes (adaptado de Rashid <i>et al.</i> , 2008)	2.27
Figura 2.22 - Influência da distância entre laminados adjacentes no modo de rotura (Rashid <i>et al.</i> , 2008)	2.29
Figura 2.23 - Efeito da espessura do betão de recobrimento lateral (adaptado de Rashid <i>et al.</i> , 2008)	2.29

Figura 2.24 - Reforço ao corte por aplicação de armaduras exteriores (Appleton e Gomes, 1997)	2.31
Figura 2.25 - Reforço ao corte por encamisamento das secções (Gomes e Appleton, 1997)	2.32
Figura 2.26 - Reforço ao corte com compósitos de CFRP	2.32
Figura 2.27 - Princípio de funcionamento dos estribos de aço e dos compósitos de CFRP (Carolin, 2003)	2.34
Figura 2.28 - Configurações possíveis para o reforço ao corte com compósitos de CFRP (Khalifa, 1999)	2.35
Figura 2.29 - Efeito da presença de estribos de aço no padrão de fendilhação de uma viga com rotura por corte (Pellegrino e Modena, 2002)	2.36
Figura 2.30 - Vigas T reforçadas ao corte por colagem externa de mantas de CFRP (Khalifa, 1999)	2.37
Figura 2.31 - Ancoragem do reforço de CFRP de manta contínua em forma de U	2.37
Figura 2.32 - Curvas carga aplicada vs deslocamento central das vigas (Khalifa, 1999)	2.38
Figura 2.33 - Vigas ensaiadas por Khalifa e Nanni (2002)	2.40
Figura 2.34 - Laminados pré-fabricados em forma de L (Sika® CarboShear L®, 2003)	2.43
Figura 2.35 - Ensaio realizado no EMPA (2002)	2.43
Figura 2.36 - Modo de rotura por destacamento do reforço de CFRP (EMPA, 1998 e Basler <i>et al.</i> , 2003)	2.43
Figura 2.37 - Definição de alguns dos parâmetros presentes nas expressões de (2.2) a (2.6)	2.45
Figura 2.38 - Associação da configuração de reforço ao modo de rotura	2.49
Figura 2.39 - Relação ε_{fe} vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$	2.49
Figura 2.40 - Relação ε_{fe} vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ para os modelos com rotura do CFRP	2.49
Figura 2.41 - Relação ε_{fe} vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ para os modelos com rotura por destacamento do CFRP	2.49
Figura 2.42 - Relação ganho de resistência ao corte vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$	2.49
Figura 2.43 - Relação ganho de resistência ao corte vs $E_s \rho_{sw} / E_f \rho_f$ (efeito da presença de estribos)	2.49
Figura 2.44 - Relação ganho de resistência ao corte vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ (efeito da presença de estribos)	2.49
Figura 2.45 - Relação ganho de resistência ao corte vs valor de a/d	2.49
Figura 2.46 - Roturas típicas de vigas reforçadas ao corte com CFRP usando a técnica EBR: CFRP aplicado em forma de U ou aplicado apenas nas faces laterais	2.52
Figura 2.47 - Tipo de ensaio realizado por De Lorenzis e Nanni (2001)	2.53
Figura 2.48 - Curvas carga aplicada vs deslocamento central das vigas sem estribos de aço De Lorenzis e Nanni (2001)	2.55
Figura 2.49 - Reforço ao corte de vigas de betão armado com varões de CFRP inseridos no betão de recobrimento das faces laterais das vigas (De Lorenzis e Nanni, 2001)	2.55

CAPÍTULO 3 - Técnica de reforço proposta e validação experimental

Figura 3.1 - Reforço ao corte de vigas de betão armado recorrendo à inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento	3.2
Figura 3.2 - Procedimentos de controlo de qualidade da aplicação de um reforço de CFRP utilizando a técnica NSM com laminados de CFRP.....	3.4
Figura 3.3 - Sequência da aplicação duma intervenção de reforço ao corte com laminados de CFRP usando a técnica NSM	3.5
Figura 3.4 - Modelos ensaiados (medidas em mm)	3.8
Figura 3.5 - Ensaios para caracterização do betão e das armaduras de aço	3.9
Figura 3.6 - Provetes de laminados de CFRP ensaiados (a) e dimensões do provete (b)	3.10
Figura 3.7 - Ensaio de tracção uniaxial de um provete de laminado de CFRP: modo de rotura e diagrama tensão vs extensão	3.10
Figura 3.8 - Fases da aplicação do reforço ao corte com faixas discretas de duas camadas de manta de CFRP unidireccional coladas externamente	3.12
Figura 3.9 - Fases da aplicação do reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento	3.13
Figura 3.10 - Esquema geral do ensaio das vigas da série A (dimensões em mm)	3.14
Figura 3.11 - Esquema geral do ensaio das vigas da série B (dimensões em mm)	3.14
Figura 3.12 - Definição de $\delta_{p,K}$: deslocamento para uma carga de $0.95F_{max,K}$ após $\delta_{Fmax,K}$	3.15
Figura 3.13 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série A (4 ϕ 10 longitudinais)	3.16
Figura 3.14 - Modos de rotura verificados nas vigas da série A com 4 ϕ 10 longitudinais	3.18
Figura 3.15 - Pormenor da zona de rotura da viga A10_M	3.18
Figura 3.16 - Fases do ensaio da viga A10_IL	3.19
Figura 3.17 - Fases do ensaio da viga A10_VL	3.19
Figura 3.18 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série A (4 ϕ 12 longitudinais)	3.20
Figura 3.19 - Modos de rotura verificados nas vigas da série A com 4 ϕ 12 longitudinais	3.21
Figura 3.20 - Pormenor da zona de rotura da viga A12_M e da viga A12_VL	3.22
Figura 3.21 - Fases do ensaio da viga A12_IL	3.22
Figura 3.22 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série B (4 ϕ 10 longitudinais)	3.23
Figura 3.23 - Modos de rotura verificados nas vigas da série B com 4 ϕ 10 longitudinais	3.24
Figura 3.24 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série B (4 ϕ 12 longitudinais)	3.25
Figura 3.25 - Modos de rotura verificados nas vigas da série B com 4 ϕ 12 longitudinais	3.27
Figura 3.26 - Pormenor dos modos de rotura das vigas B10_IL, B12_IL, B12_M e B12_VL	3.27

Figura 3.27 - Influência na eficácia das técnicas de reforço testadas dos seguintes parâmetros: a) percentagem de CFRP, b) altura da viga e c) percentagem de armadura longitudinal	3.31
Figura 3.28 - Valores do ganho de resistência por comprimento de CFRP aplicado nas vigas reforçadas ao corte com laminados inseridos	3.33
CAPÍTULO 4 - Análise experimental da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado	
Figura 4.1 - Dados gerais sobre as vigas ensaiadas (dimensões em mm)	4.2
Figura 4.2 - Execução e armazenamento das vigas ensaiadas na série A	4.6
Figura 4.3 - Geometria das vigas da série A (dimensões em mm)	4.8
Figura 4.4 - Vigas ensaiadas da série A: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado)	4.9
Figura 4.5 - Esquema geral do ensaio das vigas	4.11
Figura 4.6 - Disposição dos transdutores de deslocamentos (LVDT's) (dimensões em mm)	4.11
Figura 4.7 - Disposição dos quatro extensómetros aplicados no laminado de CFRP instrumentado ao longo do seu comprimento L (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4)	4.12
Figura 4.8 - Disposição dos três extensómetros num estribo de aço instrumentado	4.12
Figura 4.9 - Localização dos estribos e laminados instrumentados	4.13
Figura 4.10 - Comportamento das vigas ensaiadas da série A: a) percentagem mínima de CFRP; b) percentagem intermédia de CFRP; c) percentagem máxima de CFRP.....	4.16
Figura 4.11 - Modos de rotura das vigas da série A sem reforço ao corte com CFRP	4.18
Figura 4.12 - Modos de rotura das vigas da série A com a percentagem mínima de CFRP	4.19
Figura 4.13 - Modos de rotura das vigas da série A com a percentagem intermédia de CFRP	4.19
Figura 4.14 - Modos de rotura das vigas da série A com a percentagem máxima de CFRP	4.20
Figura 4.15 - Pormenorização da zona de rotura das vigas da série A com a percentagem máxima de CFRP.....	4.20
Figura 4.16 - Efeito da percentagem de CFRP no modo de rotura das vigas	4.21
Figura 4.17 - Alguns pormenores das vigas da série A	4.21
Figura 4.18 - Eficácia do reforço de CFRP nos modelos ensaiados da série A	4.22
Figura 4.19 - Eficácia do reforço vs percentagem de CFRP: (1) em termos de $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-A}$ e (2) em termos de $(\Delta F / F^{2S-R-A})_{max}$	4.22
Figura 4.20 - Extensões no CFRP vs percentagem de CFRP	4.24
Figura 4.21 - Extensões no laminado instrumentado até à carga máxima (viga 2S-3LI60-A)	4.27
Figura 4.22 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 2S-3LI60-A)	4.27
Figura 4.23 - Geometria das vigas da série B (dimensões em mm)	4.30

Figura 4.24 - Vigas ensaiadas da série B: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado)	4.34
Figura 4.25 - Ensaio de tracção uniaxial de um provete de laminado de CFRP instrumentado	4.36
Figura 4.26 - Realização de ensaios de pull-off	4.37
Figura 4.27 - Disposição dos extensómetros aplicados na manta de CFRP instrumentada: a) vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ e b) vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$	4.38
Figura 4.28 - Localização dos estribos e laminados instrumentados nas vigas da série B com $\rho_{sw} = 0.10\%$ e na viga 7S-R-B	4.39
Figura 4.29 - Localização dos estribos e laminados instrumentados nas vigas da série B com $\rho_{sw} = 0.17\%$	4.40
Figura 4.30 - Comportamento das vigas ensaiadas da série B com $\rho_{sw} = 0.10\%$: a) percentagem mínima de CFRP; b) percentagem intermédia de CFRP; c) percentagem máxima de CFRP	4.42
Figura 4.31 - Modos de rotura das vigas da série B sem reforço ao corte com CFRP	4.46
Figura 4.32 - Modos de rotura das vigas da série B com a percentagem mínima de CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$)	4.47
Figura 4.33 - Modos de rotura das vigas da série B com a percentagem intermédia de CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$)	4.48
Figura 4.34 - Modos de rotura das vigas da série B com a percentagem máxima de CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$)	4.49
Figura 4.35 - Modos de rotura das vigas da série B com mantas de CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$)	4.50
Figura 4.36 - Sequência do ensaio da viga 2S-4LI45-B (carga máxima = 392.8 kN)	4.50
Figura 4.37 - Sequência do ensaio da viga 2S-7LI45-B (carga máxima = 421.7 kN)	4.51
Figura 4.38 - Sequência do ensaio da viga 2S-10LI45-B (carga máxima = 446.5 kN)	4.51
Figura 4.39 - Sequência do ensaio da viga 2S-7M(2)-B (carga máxima = 370.1 kN)	4.51
Figura 4.40 - Vários pormenores das vigas da série B reforçadas com CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$)	4.52
Figura 4.41 - Eficácia do reforço vs percentagem de CFRP em termos de $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-B}$	4.53
Figura 4.42 - Extensões no CFRP vs percentagem de CFRP	4.56
Figura 4.43 - Variação da extensão nos CFRP instrumentados ao longo da altura da alma da viga 2S-4LI45-B ...	4.57
Figura 4.44 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima (viga 2S-4LI45-B)	4.58
Figura 4.45 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 2S-4LI45-B)	4.59
Figura 4.46 - Comportamento das vigas ensaiadas da série B com $\rho_{sw} = 0.17\%$: a) percentagem mínima de CFRP; b) percentagem intermédia de CFRP	4.60
Figura 4.47 - Modos de rotura das vigas da série B com $\rho_{sw} = 0.17\%$	4.64
Figura 4.48 - Efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica NSM com laminados ($\rho_{sw} = 0.10\%$: linhas a traço cheio; $\rho_{sw} = 0.17\%$: linhas a tracejado)	4.66

Figura 4.49 - Efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica NSM com laminados (padrão de fendilhação)	4.67
Figura 4.50 - Efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia do reforço em termos de acréscimo de rigidez	4.68
Figura 4.51 - Geometria das vigas da série C (dimensões em mm)	4.72
Figura 4.52 - Vigas ensaiadas da série C: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado)	4.72
Figura 4.53 - Localização dos estribos e laminados instrumentados nas vigas da série C	4.75
Figura 4.54 - Comportamento das vigas ensaiadas da série C com a menor percentagem de CFRP: a) capacidade de carga; b) rendimento do CFRP	4.78
Figura 4.55 - Comportamento das vigas ensaiadas da série C com a maior percentagem de CFRP: a) capacidade de carga; b) rendimento do CFRP	4.79
Figura 4.56 - Efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia das soluções de reforço testadas na série de vigas C	4.80
Figura 4.57 - Modos de rotura das vigas da série C	4.81
Figura 4.58 - Sequência do ensaio da viga 2S-4LI45-C (carga máxima = 283.0 kN)	4.82
Figura 4.59 - Sequência do ensaio da viga 2S-7LI45-C (carga máxima = 306.5 kN)	4.83
Figura 4.60 - Sequência do ensaio da viga 4S-4LI45-C (carga máxima = 347.2 kN)	4.83
Figura 4.61 - Sequência do ensaio da viga 4S-7LI45-C (carga máxima = 356.4 kN)	4.83
Figura 4.62 - Vários pormenores da rotura das vigas da série C reforçadas com CFRP	4.84
Figura 4.63 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima (viga 4S-4LI45-C)	4.88
Figura 4.64 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 4S-4LI45-C)	4.88
Figura 4.65 - Geometria das vigas da série D (dimensões em mm)	4.93
Figura 4.66 - Vigas ensaiadas da série D: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado)	4.93
Figura 4.67 - Armaduras das vigas da série D: a) viga C-R-D; b) vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ no vão de corte a ; c) vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$ no vão de corte a	4.95
Figura 4.68 - Disposição dos transdutores de deslocamentos (LVDT's) nas vigas da série D	4.97
Figura 4.69 - Localização dos estribos e laminados instrumentados das vigas da série D	4.98
Figura 4.70 - Disposição dos extensómetros aplicados: a) CFRP A e C (Ext.1, Ext.2 e Ext.3) e b) CFRP B (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4)	4.99
Figura 4.71 - Padrão de fendilhação instalado no vão de corte a após a realização do ensaio de pré-fendilhação (ensaio tipo I)	4.100
Figura 4.72 - Curvas carga total vs deslocamento central do ensaio de pré-fendilhação (tipo I)	4.101
Figura 4.73 - Vigas pré-fendilhadas após a aplicação do reforço de CFRP	4.101

Figura 4.74 - Localização das secções dos laminados onde foram colados os extensómetros eléctricos nas vigas pré-fendilhadas	4.102
Figura 4.75 - Comportamento das vigas ensaiadas da série D com a menor percentagem de CFRP: a) capacidade de carga; b) rendimento do CFRP	4.104
Figura 4.76 - Comportamento das vigas ensaiadas da série D com a maior percentagem de CFRP: a) capacidade de carga; b) rendimento do CFRP	4.105
Figura 4.77 - Padrão de fendilhação associado a uma quebra de rigidez nas vigas 3S-R-D e 5S-R-D	4.106
Figura 4.78 - Efeito da percentagem de estribos de aço (vigas da série D)	4.107
Figura 4.79 - Modos de rotura das vigas da série D sem pré-fendilhação	4.109
Figura 4.80 - Fases do ensaio da viga 3S-6LV-D (carga máxima = 387.0 kN)	4.110
Figura 4.81 - Fases do ensaio da viga 3S-5LI60-D (carga máxima de 497.9 kN)	4.110
Figura 4.82 - Fases do ensaio da viga 5S-5LI45-D (carga máxima de 559.5 kN)	4.110
Figura 4.83 - Alguns pormenores das vigas da série D	4.110
Figura 4.84 - Fases do ensaio da viga 3S-9LI45-D (carga máxima de 563.6 kN)	4.112
Figura 4.85 - Fases do ensaio da viga 5S-9LI45-D (carga máxima de 627.5 kN)	4.112
Figura 4.86 - Fases do ensaio da viga 5S-8LI60-D (carga máxima de 654.6 kN)	4.112
Figura 4.87 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-5LI60-D	4.117
Figura 4.88 - Comparação do comportamento das vigas com $a/d=3.3$ (série D) com o de vigas com $a/d = 2.5$ (série B) reforçadas com as mesmas soluções de CFRP (vigas com ρ_{sw} de 0.10%)	4.119
Figura 4.89 - Comparação do comportamento das vigas com $a/d=3.3$ (série D) com o de vigas com $a/d = 2.5$ (série B) reforçadas com as mesmas soluções de CFRP (vigas com ρ_{sw} de 0.16%-0.17%)	4.120
Figura 4.90 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas pré-fendilhadas: a) com três estribos de aço no vão de corte a ; b) com cinco estribos de aço no vão de corte a	4.121
Figura 4.91 - Fases do ensaio da viga 3S-5LI45F1-D (carga máxima = 531.4 kN)	4.122
Figura 4.92 - Fases do ensaio da viga 3S-5LI45F2-D (carga máxima = 490.6 kN)	4.123
Figura 4.93 - Modos de rotura das vigas pré-fendilhadas com três estribos de aço no vão de corte a	4.123
Figura 4.94 - Fases do ensaio da viga 5S-5LI45F-D (carga máxima = 611.9 kN)	4.124
Figura 4.95 - Fases do ensaio da viga 5S-5LI60F-D (carga máxima = 554.8 kN)	4.124
Figura 4.96 - Modos de rotura das vigas pré-fendilhadas com cinco estribos de aço no vão de corte a	4.125
Figura 4.97 - Pormenores dos ensaios das vigas com CFRP pré-fendilhadas	4.125
Figura 4.98 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 5S-5LI60F-D	4.127

CAPÍTULO 5 - Análise geral dos resultados experimentais do Capítulo 4

Figura 5.1 - Comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte por inserção de laminados de CFRP (comparação com o comportamento de uma viga não reforçada)	5.3
--	-----

Figura 5.2 - Comparação do padrão de fendilhação de uma viga com e sem o reforço de CFRP	5.3
Figura 5.3 - Efeito da pré-fendilhação do betão na eficácia da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP (adaptada da Figura 4.90-a)	5.4
Figura 5.4 - Comparação de três formas diferentes de aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado (ver Tabela 4.7 e Figura 4.24 para identificar os modelos apresentados)	5.6
Figura 5.5 - Efeito da percentagem de CFRP: (a) três percentagens de reforço com laminados a 60°; (b) três percentagens de reforço com laminados a 45°	5.10
Figura 5.6 - Modos de rotura de vigas com a mesma solução de reforço, mas de betão de distinta classe de resistência	5.10
Figura 5.7 - Distância mínima entre laminados a colocar numa solução de reforço ao corte com CFRP	5.10
Figura 5.8 - Mobilização dos estribos de aço nas vigas 2S-R-A, 2S-5LI45-A e 2S-8LI45-A (nas vigas com CFRP a fenda diagonal alcança o banzo numa secção mais afastada do que o registado na viga sem CFRP)	5.13
Figura 5.9 - Mobilização dos estribos de aço nas vigas 2S-R-B, 2S-7LV-B e 2S-10LV-B	5.14
Figura 5.10 - Mobilização dos estribos de aço nas vigas 2S-R-C e 2S-7LV-C	5.14
Figura 5.11 - Mobilização dos estribos de aço nas vigas 3S-R-D, 3S-6LV-D, 3S-10LV-D, 3S-5LI45-D, 3S-5LI45F2-D, 3S-5LI60-D, 3S-9LI45-D e 3S-8LI60-D	5.14
Figura 5.12 - Dados para a determinação analítica da extensão efectiva do CFRP	5.16
Figura 5.13 - Efeito do betão na eficácia de uma solução de reforço de CFRP em termos de V_f	5.19
Figura 5.14 - Efeito da resistência do betão na eficácia de uma solução de reforço de CFRP em termos de ε_{fe}	5.20
Figura 5.15 - Efeito da percentagem de estribos de aço na eficácia de uma solução de reforço de CFRP	5.22
Figura 5.16 - Influência da percentagem de estribos de aço na efectividade do CFRP	5.23
Figura 5.17 - Efeito da resistência do betão na eficácia de uma solução de reforço de CFRP	5.23
Figura 5.18 - Efectividade do reforço de CFRP (ε_{fe}) em função da percentagem ρ_f	5.24
Figura 5.19 - Efectividade do reforço de CFRP (ε_{fe}) em função do parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$	5.25
Figura 5.20 - Contribuição do reforço de CFRP (V_f) em função do parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$	5.26
Figura 5.21 - Efeito da orientação do CFRP na eficácia da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados.	5.27
Figura 5.22 - Efectividade do reforço de CFRP (ε_{fe}) em função da orientação do CFRP.....	5.29
Figura 5.23 - Contribuição do reforço de CFRP (V_f) em função da orientação do CFRP.....	5.29

CAPÍTULO 6 - Formulação analítica para definir a extensão efectiva no reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos

Figura 6.1 - Definição da curva de tendência da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) com o parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm})^{2/3}$ para as soluções de laminados a 45°	6.3
--	-----

Figura 6.2 - Definição da curva de tendência da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) com o parâmetro $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ para as soluções de laminados a 60°	6.3
Figura 6.3 - Definição da curva de tendência da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) com o parâmetro $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ para as soluções de laminados verticais	6.4
Figura 6.4 - Variação da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) vs $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ em função da orientação do CFRP atendendo às equações (6.1) a (6.3)	6.4
Figura 6.5 - Variação da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) vs $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ em função da orientação do CFRP atendendo às equações (6.1) a (6.3) (generalização)	6.5
Figura 6.6 - Valores de k para a totalidade das vigas analisadas	6.9
Figura 6.7 - Valores de k para a totalidade das vigas analisadas considerando o factor γ_f	6.10
Figura 6.8 - Comparação entre os valores experimentais e analíticos da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f)	6.11
Figura 6.9 - Comparação entre os valores experimentais (Cenário A) e analíticos da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f)	6.12

Índice de tabelas

CAPÍTULO 2 - Revisão bibliográfica

Tabela 2.1 - Propriedades típicas do betão, do aço e de fibras de carbono (adaptado de Carolin (2003))	2.4
Tabela 2.2 - Propriedades de resinas utilizadas em materiais compósitos	2.4
Tabela 2.3 - Desempenho do reforço de CFRP (Fortes <i>et al.</i> , 2002)	2.20
Tabela 2.4 - Ensaios para caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP	2.23
Tabela 2.5 - Principais resultados dos ensaios realizados em vigas (Teng <i>et al.</i> , 2006)	2.26
Tabela 2.6 - Ensaios para caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP (comparação NSM vs EBR)	2.27
Tabela 2.7 - Ensaios para caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP (efeito do recobrimento lateral)	2.29
Tabela 2.8 - Resultados dos ensaios realizados por Khalifa (1999)	2.39
Tabela 2.9 - Modelos ensaiados por Khalifa e Nanni (2002)	2.40
Tabela 2.10 - Resultados dos modelos ensaiados por Chaallal <i>et al.</i> (1998)	2.42
Tabela 2.11 - Informações gerais sobre os trabalhos de investigação considerados para a constituição da base de dados de resultados experimentais sobre o reforço ao corte com CFRP (técnica da colagem externa)	2.46
Tabela 2.12 - Resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte por intermédio da colagem externa de CFRP	2.47
Tabela 2.13 - Modelos ensaiados por De Lorenzis e Nanni (2001)	2.54

CAPÍTULO 3 - Técnica de reforço proposta e validação experimental

Tabela 3.1 - Séries de vigas ensaiadas	3.7
Tabela 3.2 - Principais propriedades do betão e do aço	3.9
Tabela 3.3 - Principais propriedades dos constituintes dos sistemas de CFRP	3.11
Tabela 3.4 - Comparação do comportamento último das vigas da série A com 4 ϕ 10	3.16
Tabela 3.5 - Comparação do comportamento último das vigas da série A com 4 ϕ 12	3.20
Tabela 3.6 - Comparação do comportamento último das vigas da série B com 4 ϕ 10	3.23
Tabela 3.7 - Comparação do comportamento último das vigas da série B com 4 ϕ 12	3.25
Tabela 3.8 - Carga máxima, esforço transversal resistente, contribuição do betão, dos estribos de aço e dos CFRP na resistência ao corte das vigas ensaiadas, e extensão última no CFRP	3.29
Tabela 3.9 - Rendimento dos CFRP vs material gasto	3.32

CAPÍTULO 4 - Análise experimental da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado

Tabela 4.1 - Parâmetros avaliados nas quatro séries de vigas ensaiadas	4.3
Tabela 4.2 - Informações gerais sobre os modelos de vigas da série A	4.8

Tabela 4.3 - Principais propriedades do betão, do aço e dos laminados de CFRP referentes à série A	4.10
Tabela 4.4 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série A)	4.15
Tabela 4.5 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP (série A)	4.24
Tabela 4.6 - Variação das extensões no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-3LI60-A (valores das extensões em ‰)	4.25
Tabela 4.7 - Informações gerais sobre os modelos de vigas da série B	4.32
Tabela 4.8 - Principais propriedades do betão, do aço, dos laminados e mantas de CFRP referentes à série B	4.37
Tabela 4.9 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série B - $\rho_{sw} = 0.10\%$)	4.43
Tabela 4.10 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP (série B - $\rho_{sw} = 0.10\%$)	4.55
Tabela 4.11 - Variação das extensões no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-4LI45-B (valores das extensões em ‰)	4.57
Tabela 4.12 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série B - $\rho_{sw} = 0.17\%$)	4.60
Tabela 4.13 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP (série B - $\rho_{sw} = 0.17\%$)	4.65
Tabela 4.14 - Efeito da percentagem ρ_{sw} das vigas da série B (análise comparativa)	4.66
Tabela 4.15 - Informações gerais sobre os modelos de vigas da série C	4.73
Tabela 4.16 - Principais propriedades do betão, do aço e dos laminados de CFRP referentes à série C	4.74
Tabela 4.17 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série C)	4.77
Tabela 4.18 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP (série C)	4.86
Tabela 4.19 - Variação das extensões no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-4LI45-C (valores das extensões em ‰)	4.87
Tabela 4.20 - Efeito do tipo de betão (análise comparativa)	4.89
Tabela 4.21 - Informações gerais sobre os modelos de vigas da série D	4.94
Tabela 4.22 - Principais propriedades do betão, do aço e dos laminados de CFRP referentes à série D	4.97
Tabela 4.23 - Localização das secções onde foram colados os extensómetros em cada um dos laminados instrumentados das vigas com CFRP pré-fendilhadas	4.102
Tabela 4.24 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série D)	4.106
Tabela 4.25 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP nas vigas da série D (sem pré-fendilhação)	4.114
Tabela 4.26 - Variação das extensões no laminado e estribo instrumentados da viga 3S-5LI60-D (valores das extensões em ‰)	4.115
Tabela 4.27 - Efeito da relação a/d (análise comparativa)	4.118
Tabela 4.28 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (efeito da pré-fendilhação)	4.121

Tabela 4.29 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP nas vigas da série D (com pré-fendilhação)	4.126
--	-------

CAPÍTULO 5 - Análise geral dos resultados experimentais do Capítulo 4

Tabela 5.1 - Comparação do comportamento na rotura de três diferentes soluções de reforço para aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado	5.5
Tabela 5.2 - Comparação do comportamento na rotura das vigas com NSM e as equivalentes EBR	5.6
Tabela 5.3 - Valores máximos das extensões registadas nos laminados de CFRP instrumentados	5.8
Tabela 5.4 - Dados para a análise geral dos resultados do programa experimental do Capítulo 4	5.17
Tabela 5.5 - Soluções de reforço de CFRP aplicadas a três tipos de betão	5.20
Tabela 5.6 - Soluções de reforço de CFRP aplicadas a duas percentagens de estribos de aço	5.21
Tabela 5.7 - Efectividade do reforço de CFRP em função da orientação dos laminados	5.28

CAPÍTULO 6 - Formulação analítica para definir a extensão efectiva no reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos

Tabela 6.1 - Análise das soluções testadas com laminados a 45°	6.8
Tabela 6.2 - Análise das soluções testadas com laminados a 60°	6.8
Tabela 6.3 - Análise das soluções testadas com laminados verticais	6.9

Capítulo 1

Introdução

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A reparação e o reforço de estruturas de betão constituem, presentemente, um dos sectores de actividade significativa da indústria da construção civil. São inúmeros os testemunhos, a nível nacional e internacional, que perspectivam que este mercado aumentará no futuro. A crescente necessidade de reabilitar e reforçar estruturas de betão, os aspectos menos positivos que as técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas apresentam, e o desenvolvimento de novos materiais com elevado desempenho foram factores determinantes no surgimento de novas técnicas de reforço.

O desenvolvimento tecnológico possibilitou o aparecimento dos materiais compósitos de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono) que, essencialmente, se caracterizam por apresentarem elevada rigidez e resistência à tracção, baixo peso específico, bom comportamento à fadiga e elevada resistência à corrosão. Além disso, refira-se que estes materiais podem ser disponibilizados com dimensões quase ilimitadas em termos de comprimento, e existem alguns tipos de CFRP que se adaptam perfeitamente a superfícies curvas. As elevadas potencialidades dos materiais compósitos de CFRP em termos mecânicos proporcionam soluções de reforço que poucas alterações introduzem na arquitectura inicial das estruturas, pois conseguem-se obter consideráveis aumentos da capacidade resistente dos elementos estruturais com recurso a pequenas quantidades de reforço. A par destas considerações, refira-se que as técnicas de reforço com compósitos de CFRP caracterizam-se pela sua facilidade e rapidez de execução.

O sucesso de uma técnica de reforço está directamente associado às propriedades dos materiais que utiliza, às questões estéticas relacionadas com a arquitectura das construções e à viabilidade económica, onde devem ser correlacionados aspectos como o preço dos materiais, a simplicidade e a rapidez de execução do reforço, a minimização dos efeitos no normal funcionamento da estrutura na altura da aplicação do reforço e os custos de manutenção após a estrutura reforçada entrar em serviço. Neste contexto, actualmente, é unanimemente aceite que as técnicas de reforço com compósitos de CFRP proporcionam soluções globalmente tão ou mais eficazes que as técnicas de reforço tradicionais.

O reforço à flexão e o confinamento de pilares com compósitos de CFRP apresentam, actualmente, um estado de conhecimento confortavelmente aprofundado, o que não acontece relativamente ao reforço ao corte com CFRP. Para tal, contribui, desde logo, o facto do comportamento de elementos

de betão armado com rotura por corte ser, por si só, um fenómeno de análise complexa. Em elementos reforçados ao corte com CFRP outros modos de rotura podem ser observados e novos aspectos associados ao CFRP aumentam a complexidade do problema do corte em vigas de betão armado.

1.2 - OBJECTIVOS DO TRABALHO

Uma intervenção de reforço ao esforço transversal de um determinado elemento estrutural de betão armado pode ser provocada por uma necessidade de mudança do tipo de utilização (aumento das cargas a actuar na estrutura), por um erro de projecto e/ou de construção, pela redução da resistência dos materiais resultante da sua degradação (carbonatação do betão e corrosão das armaduras), por alterações nos códigos de dimensionamento com a introdução de disposições mais severas, ou pela ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões, cheias ou actos de vandalismo). Além disso, refira-se também os casos de elementos estruturais que, posteriormente a uma intervenção de reforço à flexão, o seu modo de rotura passa a ser por corte. Esta ocorrência não é recomendável, devendo ser evitada, uma vez que a rotura por corte é frágil e quase instantânea (sem aviso). Assim, à necessidade de um reforço à flexão pode, também, estar associada a necessidade de um reforço ao esforço transversal de forma a impor à estrutura reforçada um modo de rotura dúctil.

Os resultados experimentais de diversos estudos científicos já realizados têm demonstrado que a aplicação da técnica da colagem externa de compósitos de CFRP, com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte, permite aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado. No entanto, como resultado de um modo de rotura caracterizado pelo destacamento prematuro do CFRP, o nível máximo de tensão mobilizado no reforço é, em geral, bastante inferior à resistência última do compósito, o que conduz a um desaproveitamento grande das elevadas potencialidades do CFRP em termos de resistência à tracção. Além disso, pelo facto do reforço estar colado externamente existe a susceptibilidade dos CFRP face a acções mecânicas, de desgaste, impacto e vandalismo.

Com o objectivo de otimizar o nível de desempenho do CFRP, quando este é aplicado de forma a ser incrementada a capacidade resistente ao esforço transversal de vigas de betão armado, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho foi definida uma linha de investigação, no âmbito desta dissertação, na qual é proposta uma técnica de reforço ao corte com CFRP, alternativa à da colagem externa, que se baseia na inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da viga.

Os objectivos definidos para a presente dissertação foram os seguintes:

- Efectuar uma compilação sobre o estado de conhecimento actual na área do reforço de estruturas de betão armado com materiais compósitos de CFRP, com particular destaque para a vertente do reforço ao corte.
- Realização de um primeiro programa experimental que permita validar a técnica de reforço proposta, comparando o seu desempenho com o obtido por outras formas alternativas de incrementar a capacidade resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado, com e sem o recurso a compósitos de CFRP.
- Uma vez validada experimentalmente a técnica de reforço proposta, e sendo assim uma alternativa tecnicamente viável às já existentes com ou sem CFRP, outro objectivo da dissertação foi desenvolver um amplo trabalho experimental que, de uma forma sustentada, permitisse dar resposta a um conjunto de questões que se passam a enumerar:
 - i) Qual o comportamento típico de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos? Quais os modos de rotura expectáveis?
 - ii) Qual é o grau de eficácia da técnica de reforço proposta nesta dissertação quando comparado com o da técnica da colagem externa de mantas de CFRP?
 - iii) De que forma é que os parâmetros como a classe de resistência do betão, a orientação e a percentagem de CFRP, a percentagem de armadura transversal existente e a relação entre o vão de corte e a altura útil da secção influenciam o desempenho da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP?
- Tendo como base a experiência adquirida ao longo da investigação experimental realizada no âmbito da dissertação, proceder à definição, quer do escalonamento das tarefas a executar numa intervenção de reforço usando a técnica proposta, como do conjunto de procedimentos a seguir por forma a que seja garantido o controlo de qualidade da aplicação do reforço de CFRP.
- Estabelecimento de uma formulação analítica que conduza à quantificação da contribuição, conferida por uma determinada solução de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos, na resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado. Para este propósito será considerada a base de dados de resultados experimentais resultante da investigação realizada no âmbito da dissertação.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A estrutura da presente dissertação consta de oito capítulos, incluindo a introdução, as considerações finais e as referências, acrescida de quatro anexos. A sua organização está de acordo com os objectivos pretendidos e que anteriormente foram apresentados.

Posteriormente a esta introdução, no Capítulo 2, descreve-se de forma resumida o resultado do trabalho de pesquisa bibliográfica efectuado sobre a temática desta dissertação. Após o enquadramento da utilização dos materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado, são apresentadas de forma genérica as técnicas de reforço que recorrem aos referidos materiais. Neste capítulo é feita uma abordagem aos aspectos tecnológicos da aplicação dos reforços de CFRP e ao desempenho estrutural dos elementos reforçados. Numa fase seguinte é dado particular destaque ao reforço ao corte de vigas de betão armado com materiais compósitos de CFRP. O princípio de aplicação destes materiais no reforço ao esforço transversal é apresentado, bem como a complexidade do fenómeno em análise. As principais vantagens e desvantagens da técnica de reforço que se baseia na colagem externa de CFRP são descritas. Tendo em consideração uma base de dados referente a resultados de trabalhos de investigação experimental já realizados é apresentado o efeito que um conjunto de parâmetros tem na eficácia da referida técnica de reforço.

Na parte inicial do Capítulo 3 é apresentada, detalhadamente, a técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado proposta nesta dissertação. Ao mesmo tempo, as boas regras de aplicação deste tipo de reforço são enunciadas. Na segunda parte deste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do primeiro programa experimental que foi realizado com o objectivo de validar a técnica de reforço ao corte proposta.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados da investigação experimental realizada, após a mencionada validação, por forma a que fosse adquirido um conhecimento sustentado sobre o comportamento que uma viga de betão armado reforçada ao corte usando a técnica da inserção de laminados de CFRP pode experimentar em função da solução de reforço executada. A estrutura do capítulo está dividida em cinco secções: a primeira refere-se à apresentação do programa experimental, o qual é composto por quatro séries de vigas de betão armado, sendo as seguintes dedicadas à apresentação e discussão, separadamente, dos resultados obtidos em cada uma das mencionadas séries de vigas.

No Capítulo 5 é efectuada uma análise geral dos resultados obtidos no programa experimental apresentado no Capítulo 4, salientando-se as principais conclusões sobre o desempenho estrutural de vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos, e que acabam por ser a

resposta ao conjunto de questões que foram enunciadas num dos objectivos inerentes a esta dissertação.

O Capítulo 6 é dedicado ao estabelecimento de uma formulação analítica que permita determinar a contribuição, conferida por uma determinada solução de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos, na resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado.

As considerações finais sobre os ensinamentos adquiridos na investigação desenvolvida ao longo desta dissertação são tecidas no Capítulo 7. Além disso, são avançadas algumas sugestões visando desenvolvimentos futuros.

A presente dissertação termina com o Capítulo 8, onde se expõe as referências bibliográficas que serviram de suporte ao trabalho da investigação desenvolvido.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

O presente capítulo refere-se ao trabalho de pesquisa bibliográfica efectuado sobre a temática da presente dissertação. Inicialmente, é feito o enquadramento da utilização dos materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado. Posteriormente, são apresentadas as técnicas de reforço que recorrem aos referidos materiais, com particular relevo para a técnica da inserção no betão de recobrimento. Será feita referência aos aspectos tecnológicos da aplicação dos reforços de CFRP e ao desempenho estrutural dos elementos reforçados. Uma segunda fase deste capítulo será dedicada ao reforço ao corte de vigas de betão armado com materiais compósitos de CFRP. O estado da arte realizado teve como ponto de partida as necessidades duma intervenção de reforço ao corte e, posteriormente, percorreu as várias técnicas de reforço ao corte actualmente utilizadas, focando as técnicas ditas tradicionais e, dando particular destaque, às técnicas mais recentes que recorrem a materiais de elevado desempenho (CFRP).

2.1 - MATERIAIS COMPÓSITOS DE CFRP NO REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO

As estruturas de betão são projectadas para um determinado período de vida útil, durante o qual devem exibir níveis adequados de segurança, funcionalidade e durabilidade. Verifica-se no entanto, com frequência, situações em que os níveis de segurança podem não ser satisfatórios. As causas deste tipo de cenário são várias: necessidade de mudança do tipo de utilização (aumento das cargas a actuar na estrutura); erros de projecto e/ou de construção; redução da resistência dos materiais resultante da sua degradação (carbonatação do betão e corrosão das armaduras); alterações nos códigos de dimensionamento com a introdução de disposições mais severas ou ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões, cheias ou actos de vandalismo). Existem diferentes tipos de intervenção para fazer face aos problemas provocados pelas causas anteriormente enunciadas, sendo de destacar as seguintes: demolição total ou parcial da estrutura; imposição de medidas restritivas no seu uso; modificação do seu sistema estrutural; substituição ou introdução de novos elementos estruturais; ou reforço de elementos estruturais. A opção por um dos referidos tipos de intervenção passa, necessariamente, por uma análise técnica e económica da situação em causa.

Em função do que se referiu anteriormente, tem-se constatado que a necessidade de reabilitar, reparar e reforçar estruturas de betão armado aumentou consideravelmente na última década, tornando-se numa parcela significativa na actividade da construção civil (Bakis *et al.*, 2002). Existem

fundamentados indícios de que nos próximos anos essa necessidade aumentará. Para o cenário de reforço de elementos estruturais, dependendo do tipo de solicitação, pode ser necessário mobilizar vários tipos de sistemas de reforço. Concretamente, pode ser necessário aumentar a resistência à flexão, ao corte, ou à flexão e ao corte em simultâneo. Também podem existir cenários em que seja necessário aumentar o confinamento do betão.

As técnicas de reforço mais utilizadas são a colagem de chapas metálicas, o encamisamento das secções e a aplicação de pré-esforço exterior. A colagem externa de chapas metálicas com epoxi tem sido uma das técnicas de reforço mais utilizada. Trata-se de uma técnica relativamente simples de executar e que recorre a materiais com comportamento conhecido. No entanto, apresenta alguns inconvenientes, nomeadamente: devido à corrosividade do aço há probabilidade elevada da zona da colagem (interface betão-cola-aço) se deteriorar; dificuldade de manipulação de pesadas chapas de aço no local da obra (especialmente em superfícies curvas); necessidade de suportes durante o tempo de cura do adesivo; limitação do comprimento das chapas, por restrições do seu transporte, podendo dar origem à necessidade de execução de juntas. O encamisamento das secções é outra técnica de reforço que também tem sido utilizada. Trata-se de uma técnica eficiente quando se pretende aumentar a ductilidade, a resistência e a rigidez, mas, em geral, implica um aumento considerável das secções transversais e das cargas permanentes a actuar na estrutura. Além disto, condiciona bastante a zona da obra durante a operação de reforço. A par da colagem externa de chapas metálicas com epoxi e do encamisamento das secções, uma das técnicas de reforço tradicionalmente utilizada é a aplicação de pré-esforço exterior. Trata-se de uma técnica que permite um controlo, simultâneo, da capacidade de carga e de deformação da estrutura. No entanto, apresenta os seguintes inconvenientes: necessidade de proteger as armaduras de pré-esforço da acção da corrosão, do fogo e de actos de vandalismo; necessidade de estabelecer sistemas de ancoragem; pode originar o aparecimento de esforços adicionais nos elementos não reforçados.

A crescente necessidade de reabilitar e reforçar estruturas, os aspectos menos positivos apresentados pelas técnicas de reforço tradicionais e o desenvolvimento de novos materiais com elevado desempenho estão na génese do aparecimento das técnicas de reforço que recorrem a materiais compósitos de FRP (polímeros reforçados com fibras). Os materiais compósitos de FRP são constituídos essencialmente por fibras embebidas numa matriz polimérica (Figura 2.1). As fibras, que são o agente estrutural dos materiais compósitos de FRP, apresentam-se sob a forma de filamentos de pequeno diâmetro, têm módulo de elasticidade e resistência à tracção elevados, baixa densidade e apresentam comportamento frágil (comportamento elástico sem patamar de cedência). As fibras podem ser colocadas apenas numa direcção (compósitos de FRP unidireccionais - a orientação

unidireccional das fibras confere ao FRP a maximização da resistência e da rigidez na direcção longitudinal) ou em várias direcções (compósitos de FRP multidireccionais).

As fibras contínuas mais correntes nos FRP para aplicações em engenharia civil são de vidro (G), de aramida (A) e de carbono (C), sendo os respectivos compósitos denominados internacionalmente por GFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro - *Glass Fiber Reinforced Polymers*), AFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida - *Aramid Fiber Reinforced Polymers*) e CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono - *Carbon Fiber Reinforced Polymers*). De entre estes três tipos de fibras, as de carbono são as que apresentam melhores propriedades mecânicas, são as mais resistentes a ataques químicos, são imunes à corrosão e não absorvem água. As fibras de vidro são as de menor custo, têm maior peso específico, apresentam grande sensibilidade a meios alcalinos e têm menor resistência a acções de fadiga. As fibras de aramida apresentam dificuldades de moldagem, têm baixa resistência à compressão, são sensíveis à fluência, à acção dos raios ultra-violetas e às temperaturas elevadas. As inúmeras vantagens que as fibras de carbono apresentam, em relação às de aramida e às de vidro, justificam que sejam as mais utilizadas na execução de reforços estruturais com recurso a materiais compósitos. Assim, a investigação efectuada no âmbito da presente revisão bibliográfica centrou-se, fundamentalmente, nos materiais compósitos com fibras de carbono (CFRP).

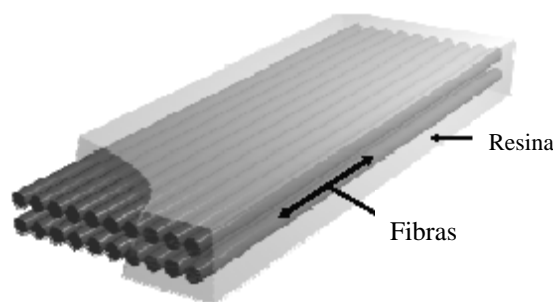


Figura 2.1 - Constituição dos materiais compósitos de FRP (Nanni, 2004).

Na Figura 2.2 (ACI 440R-96, 1996) apresentam-se diagramas tensão vs extensão representativos do comportamento à tracção uniaxial dos seguintes materiais: aço convencional tipo A500, cordões de armadura de pré-esforço, fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade (HM), fibras de carbono de elevada resistência (HS), fibras de aramida e fibras de vidro. Na Tabela 2.1 apresentam-se valores “típicos” de propriedades do betão, do aço e de fibras de carbono. Verifica-se que a densidade das fibras de carbono é cerca de 25% da do aço e 75% da do betão. Para além de serem mais leves, as fibras de carbono apresentam, em termos de rigidez e de capacidade máxima resistente, valores que superam largamente os dos dois materiais mais comuns em aplicações da engenharia civil, o betão e o aço.

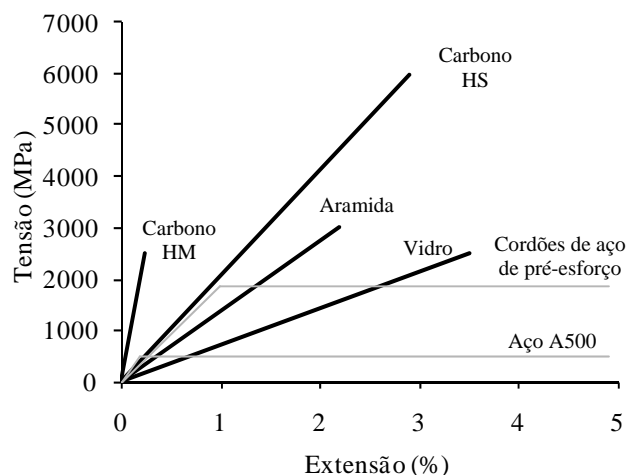


Figura 2.2 - Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras (carbono, aramida e vidro), do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço (adaptado de ACI 440R-96 (1996)).

Tabela 2.1 - Propriedades típicas do betão, do aço e de fibras de carbono (adaptado de Carolin (2003)).

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à compressão [MPa]	Resistência à tracção [MPa]	Densidade [Kg/m ³]
Betão	20-40	10-60	1-3	2400
Aço	200-210	400-690	400-690	7800
Fibras de carbono*	200-800	-	2500-6000	1750-1950

* - Propriedades das fibras de carbono, não do compósito.

Tabela 2.2 - Propriedades de resinas utilizadas em materiais compósitos.

Resina	Módulo de elasticidade à tracção [GPa]	Resistência à tracção [MPa]	Extensão na rotura [%]	Densidade [Kg/m ³]
Polyester	2.1-4.1	20-100	1.0-6.5	1000-1450
Epoxi	2.5-4.1	55-130	1.5-9.0	1100-1300

A matriz é a segunda componente dos materiais compósitos de CFRP, tendo por função garantir que as fibras funcionem em conjunto, protegendo-as das agressões ambientais, dos danos mecânicos e dos fenómenos de instabilidade. Assim, apesar de influenciar muito pouco as propriedades mecânicas que os CFRP apresentam, a matriz assume um papel fundamental no comportamento do material compósito. Para a matriz, a escolha tem recaído em resinas termoendurecíveis, do tipo epoxi, devido às excelentes propriedades em termos de aderência à maior parte dos materiais, de resistência mecânica e à agressividade do meio ambiente, e, ainda, pelo facto de não absorverem água. Na

Tabela 2.2 registam-se algumas das propriedades dos dois tipos de resinas mais utilizadas nos materiais compósitos de CFRP: as de polyester e as de epoxi (Carolin, 2003).

Além de fazerem parte da constituição do material de CFRP, as resinas também são utilizadas como elementos de ligação do CFRP ao betão e, em alguns casos, como elemento para regularizar a superfície (designada por “putty”) e/ou para melhorar a aderência da ligação betão/CFRP (primário). As formas comerciais dos CFRP (Figura 2.3) podem ser classificadas em dois grupos principais, os sistemas pré-fabricados unidireccionais (laminados e varões) e os sistemas curados “in situ”. Estes últimos ainda podem ser classificados em sistemas unidireccionais (mantas) e multidireccionais (tecidos) devido à disposição das fibras no compósito. Os primeiros sistemas são fornecidos sob a forma de perfis pré-fabricados e têm as características mecânicas e físicas garantidas pelos seus produtores. O elemento de ligação do CFRP ao betão é designado por adesivo e é um material distinto do compósito. Os segundos sistemas (mantas ou tecidos) consistem na aplicação de feixes de fibras contínuas em estado seco ou pré-impregnado, sobre uma resina epoxídica previamente espalhada na superfície a reforçar. A resina de saturação tem as funções de impregnar o grupo de fibras, proporcionar a polimerização do conjunto num compósito de CFRP e, por fim, desenvolver propriedades de aderência na ligação CFRP-betão (Dias *et al.*, 2006).

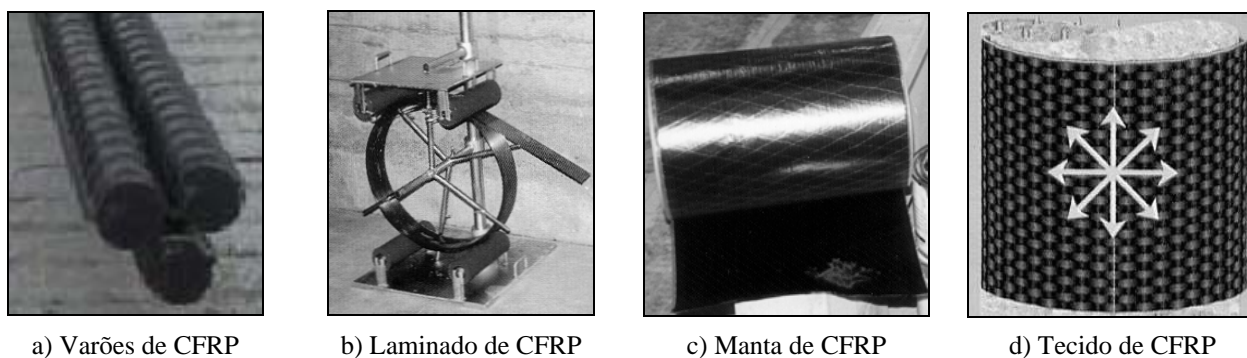


Figura 2.3 - Materiais compósitos de CFRP (sistemas pré-fabricados: varões e laminados; sistemas curados “in situ”: mantas e tecidos).

Os compósitos de CFRP têm inúmeras vantagens relativamente aos materiais tradicionais, nomeadamente, o aço, a madeira e o betão (Bakis *et al.*, 2002). Destacam-se, comparativamente aos referidos materiais, pelos elevados valores das relações resistência à tracção/peso e rigidez/peso e pela elevada resistência à corrosão (em comparação directa com o aço). O reduzido peso específico dos compósitos de CFRP e o seu elevado desempenho, evidenciado nas características mecânicas que apresentam, permitem soluções de reforço leves, às quais necessariamente estão associados aspectos como a facilidade de transporte e manuseamento, o pouco acréscimo de cargas a solicitar a estrutura e a minimização dos efeitos na arquitectura inicial das construções. Com efeito, conseguem-se obter consideráveis aumentos da capacidade resistente dos elementos estruturais por intermédio de

pequenas quantidades de reforço. O facto dos CFRP apresentarem elevada resistência à corrosão alarga o campo de aplicação das técnicas de reforço que utilizam estes materiais, podendo ser utilizadas, por exemplo, em ambientes agressivos como são o caso das zonas costeiras. Além disso, uma característica importante deste tipo de materiais é a sua versatilidade, quer em termos de dimensões (disponíveis em várias espessuras, vários tipos de secções transversais e com comprimento que, teoricamente, poderá ser infinito), como em termos de adaptabilidade a qualquer tipo de superfície (o que é difícil e oneroso de se conseguir por meio de chapas metálicas). Ao mesmo tempo existe a possibilidade do reforço de CFRP ser colocado de forma a otimizar o seu desempenho, dispondo-o de forma a que a direcção das fibras se aproxime, o mais possível, da direcção das tensões principais de tracção. A disponibilização destes materiais com dimensões quase ilimitadas em termos de comprimento, ao contrário do que acontece com as chapas de aço, elimina a necessidade de executar emendas no reforço. A Figura 2.4 apresenta, a título qualitativo, algumas das vantagens que se acabam de referir relativamente à utilização de materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão.

Se as questões do desempenho mecânico e de durabilidade são uma mais-valia dos compósitos de CFRP face aos materiais tradicionais, o seu comportamento quando exposto a altas temperaturas, nomeadamente à acção do fogo, deve ter uma atenção muito especial. Com efeito, perante este cenário, a presença das colas (resinas, adesivos, primários, “putty”), na composição dos CFRP, no elemento de ligação ao betão e/ou no elemento de regularização/tratamento da superfície de betão a reforçar, condiciona o bom desempenho de uma solução de reforço de CFRP, tal como acontece a qualquer solução de reforço que recorra à colagem. Se o reforço de CFRP ficar directamente exposto à acção de temperaturas elevadas existe a possibilidade de uma degradação da ligação colada CFRP-betão e de uma diminuição das próprias características mecânicas do CFRP, nomeadamente, a resistência e a rigidez. Por exemplo, a temperatura de transição vítrea do adesivo da ligação betão/CFRP (a temperatura a partir da qual há um amolecimento do material) é da ordem dos 50 a 60°C, valores estes rapidamente alcançáveis num cenário de incêndio (Barnes e Fidell, 2006). Enquanto não surgirem materiais de colagem com elevada resistência à acção de temperaturas elevadas, qualquer solução estrutural de reforço com CFRP deve ser acompanhada por uma solução de protecção deste à acção de temperaturas elevadas.

O elevado custo dos materiais compósitos de CFRP, quando comparado com o custo dos materiais convencionais, pode, aparentemente, ser o maior obstáculo à sua utilização. No entanto, a comparação directa do preço base unitário pode não ser o critério mais apropriado para uma análise comparativa de custos. Quando o custo da instalação/execução do reforço é incluído numa análise económica de várias soluções de reforço, as técnicas que recorrem aos compósitos de CFRP tornam-

se mais competitivas. Com efeito, o baixo peso específico dos CFRP facilita o seu transporte e a operação de execução do reforço. Esta, por outro lado, é simples e rápida de executar, mesmo em zonas de difícil acesso ou em zonas onde o normal funcionamento da estrutura não possa ser posto em causa (por exemplo zonas em que o trânsito não pode ser cortado, conforme representado na Figura 2.4). Além disso, a execução do reforço com CFRP exige poucos elementos de suporte (andaimes) e algumas das suas tarefas podem ser realizadas num local que não seja o local da obra, o que diminui o tempo de operação do reforço “in situ”. Se a comparação de custos das várias técnicas de reforço incluir ainda os custos de manutenção durante a vida útil da estrutura reforçada, as que recorrem aos CFRP podem ter uma significativa vantagem. A somar a todos os aspectos que se acabam de referir saliente-se que, em virtude da sua maior utilização, o custo dos CFRP tem vindo a diminuir, enquanto que, nos últimos anos, o custo do aço tem aumentado significativamente.

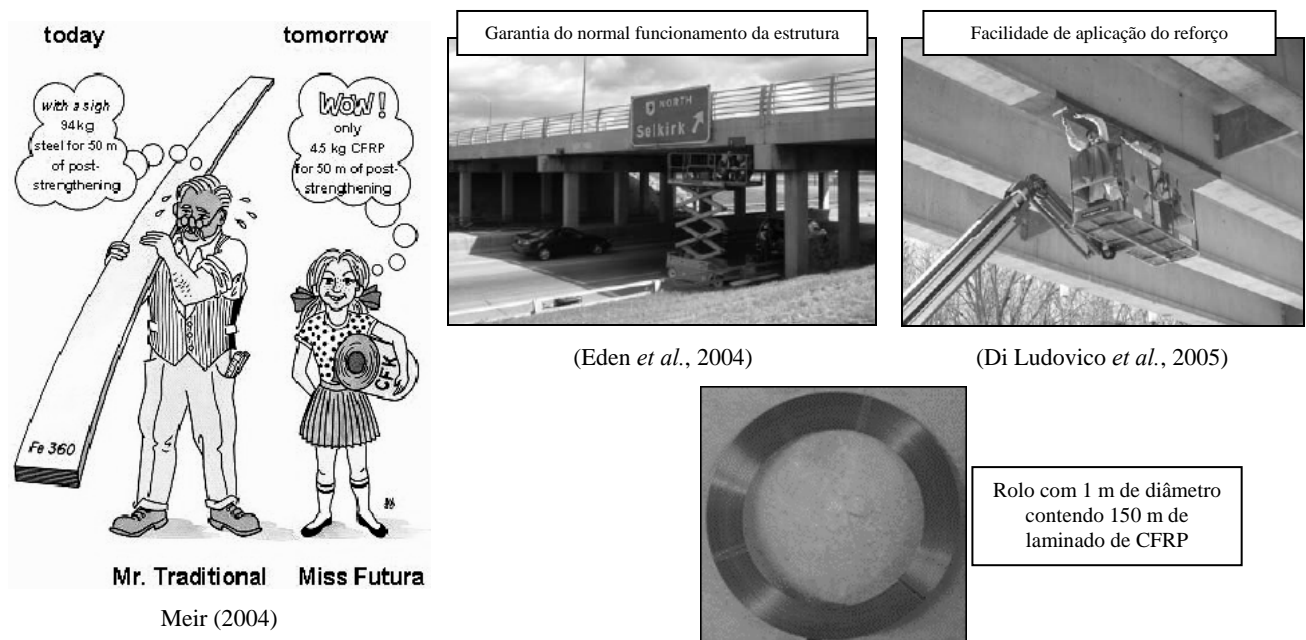


Figura 2.4 - Vantagens da utilização dos materiais compósitos de CFRP.

O sucesso de uma técnica de reforço está directamente associado às propriedades dos materiais que utiliza; às questões estéticas relacionadas com a arquitectura das construções e com o meio ambiente; e à viabilidade económica onde devem ser correlacionados aspectos como o preço dos materiais, a simplicidade e a rapidez de execução do reforço, a minimização dos efeitos no normal funcionamento da estrutura, assim como os custos de manutenção após a estrutura reforçada entrar em serviço. Perante isto, e face ao que anteriormente foi dito, actualmente, é unanimemente aceite que as técnicas de reforço com CFRP proporcionam soluções globalmente tão ou mais eficazes que as técnicas de reforço tradicionais (encamisamento das secções, colagem de elementos metálicos e aplicação de pré-esforço exterior).

Esta realidade tem-se reflectido no número cada vez mais crescente de obras de reforço em que a solução adoptada é a que se baseia na utilização de compósitos de CFRP. Este cenário tem ditado o aparecimento de várias propostas de dimensionamento para o reforço de estruturas de betão com compósitos de CFRP, nomeadamente, quando estes são aplicados recorrendo à técnica da colagem externa (ver secção 2.2): *ACI 440.2R-02* (ACI Committee 440, 2002) publicado pelo “American Concrete Institute (*ACI*)” (América); *Canadian CSA-S806-02* (CSA-S806-02, 2002) publicado pela “Canadian Standards Association (*CSA*)” (América); *fib* - Bulletin 14 (*fib* - Bulletin 14, 2001) publicado pela “Fédération Internationale du Béton (*fib*)” (Europa); Concrete Society 2000 (Concrete Society, 2000) publicado pela “The Concrete Society” do Reino Unido (Europa); *JSCE* (JSCE, 2001) publicado pela “Japan Society of Civil Engineers (*JSCE*)” (Ásia). Estes documentos são o principal testemunho da aceitação e da globalização das soluções de reforço de estruturas de betão com compósitos de CFRP. Como nota histórica refira-se que o reforço à flexão de pontes de betão armado (Meier, 1987 e Rostasy, 1987) e o confinamento de pilares de betão armado (Fardis e Khalili, 1981 e Katsumata *et al.*, 1987) são indicadas como sendo as primeiras aplicações de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão.

2.2 - TÉCNICAS DE REFORÇO USANDO MATERIAIS COMPÓSITOS DE CFRP

As técnicas de reforço usando compósitos de CFRP podem ser divididas em dois grandes grupos. Um que engloba a técnica da colagem externa, designada na literatura internacional por “*Externally Bonded Reinforcement*” (*EBR*), e que tem como princípio a colagem do CFRP nas faces exteriores dos elementos a reforçar, segundo uma configuração que depende do tipo de reforço pretendido: na face tensionada no caso do reforço à flexão, nas faces laterais (com hipótese de se poder estender para outras faces) no caso do reforço ao corte, ou encamisando as secções para aumentar o confinamento em pilares (Figura 2.5). Em termos de CFRP e usando a técnica EBR podem ser aplicados laminados e mantas unidireccionais ou tecidos multidireccionais. Trata-se de uma técnica já extensivamente estudada ao nível da investigação científica e que já foi implementada num número significativo de intervenções de reforço. O segundo grupo diz respeito à técnica da inserção de varões ou laminados unidireccionais de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento e é designada na literatura internacional por *Near Surface Mounted* (*NSM*). O princípio da técnica NSM é o mesmo da técnica da colagem externa (EBR) mas, em vez dos CFRP estarem colados externamente encontram-se inseridos no betão de recobrimento (Figura 2.5). Trata-se de uma técnica mais recente que a técnica EBR e, a comprovar este facto, refira-se que na última edição de uma das mais conceituadas conferências internacionais sobre a utilização dos compósitos de FRP no reforço de estruturas de

betão (8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS8 (2007)) foram apresentados cento e trinta e um trabalhos científicos relacionados directamente com a técnica da colagem externa, enquanto apenas catorze comunicações se dedicaram à técnica NSM.



Figura 2.5 - Técnicas de reforço com CFRP: colagem externa (EBR) e inserção (NSM).

2.2.1 - A técnica da colagem externa (EBR)

A aplicação de sistemas compósitos de CFRP no reforço de elementos de betão segundo a técnica da colagem externa envolve essencialmente três tarefas (Juvandes *et al.*, 2003):

- i) preparação da superfície do elemento de forma a garantir que a base tenha boas condições de aderência. No caso do sistema curado “in situ” a superfície deve ser esmerilada (Figura 2.6-a)), enquanto que no caso dos laminados a superfície do elemento deve ser bojardada com jacto de areia ou ser “picotada” com um martelo de agulhas (Figura 2.6-d)). De seguida, a superfície tratada deve ser limpa por intermédio da aplicação de ar comprimido. Em alguns sistemas de reforço recomenda-se a aplicação de uma camada de primário (Figuras 2.6-b) e 2.6-e)), de forma a melhorar a aderência dos CFRP à superfície do elemento a reforçar.
- ii) colagem propriamente dita do reforço. Nas Figuras 2.6-c) (manta) e 2.6-f) (laminado) apresentam-se pormenores da colagem dos reforços de CFRP;

iii) controlo de qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação.

Relativamente ao controlo de qualidade da técnica de reforço referido na tarefa iii), existem resultados de ensaios experimentais de vários autores que permitem comprovar que uma deficiente aplicação do reforço de CFRP pode originar uma quase ineficácia deste. Por exemplo, um teor elevado de humidade na superfície do elemento a reforçar impossibilita uma aderência adequada entre o betão e o primário e, conseqüentemente, a perda de eficiência do sistema de reforço (Juvandes *et al.*, 2003). A limpeza dos laminados com desengordurante não específico do sistema de reforço adoptado (sem acetona) também pode originar uma ineficácia do reforço (Dias *et al.*, 2002).

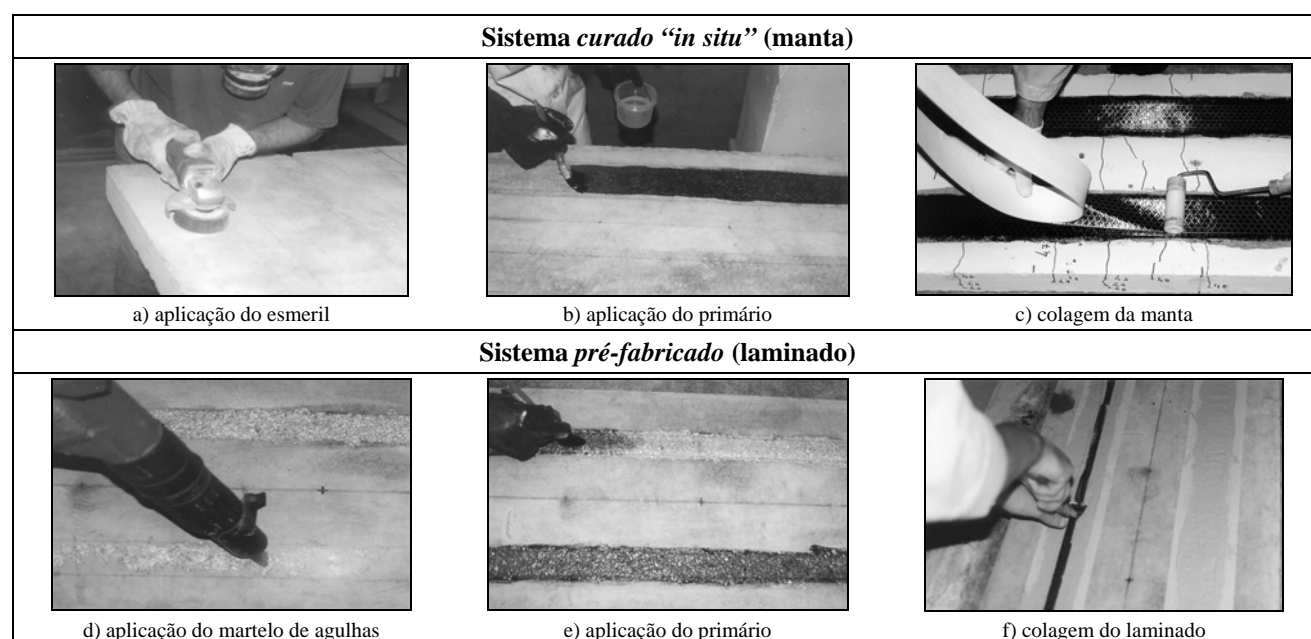


Figura 2.6 - Aplicação de sistemas de reforço de CFRP segundo a técnica da colagem externa (Dias, 2001).

Deste modo, existe um conjunto de medidas a tomar antes, durante e após a aplicação do reforço de CFRP de forma a minimizar os riscos de se proceder a um deficiente reforço, designadamente (Bettor, 2003; Carolin, 2003; Eurocomp, 1986; Juvandes, 1999 e Sika, 2001):

- a avaliação da qualidade do betão da superfície do elemento estrutural a reforçar deve ser efectuada recorrendo a ensaios de tracção directa de “pull-off”. Segundo o ACI Committee 440 (2002), para a aplicação da técnica da colagem externa com compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão o valor mínimo recomendável da resistência à tracção superficial deve ser de 1.4 MPa.
- todas as irregularidades da superfície a reforçar devem ser tratadas utilizando como elemento de regularização o “putty”;
- a base do betão deve estar limpa (sem partículas soltas), seca e isenta de gorduras e óleos, não devendo o teor máximo de humidade exceder 4%;
- a humidade relativa da superfície de betão não deve ser superior a 80% na altura da aplicação do reforço;

- a temperatura do ar deve ser, no mínimo, de 10°C e superior, em 3°C, à temperatura que origina a formação de orvalho;
- é recomendado a fixação de um limite superior para a amplitude térmica esperada numa aplicação normal da construção (T_c) de valor igual ao da temperatura de transição vítrea (T_g) das resinas ou dos adesivos, reduzido de 10°C a 20°C [$T_c \leq T_g - 10^\circ\text{C}$ (a 20°C)];
- as misturas das duas componentes (resina e endurecedor) fornecidas pelo fabricante devem ser efectuadas atendendo às especificações técnicas, quer em termos de dosagens como no modo de mistura;
- deve ser respeitado o tempo prático de utilização (“pot-life”) das resinas e adesivos;
- na aplicação do sistema de manta deve ser garantido o alinhamento das fibras e deve-se evitar a formação de bolhas de ar;
- após a colagem do laminado, deve-se verificar, aplicando pancadas suaves, que não existem vazios entre o adesivo e o laminado;
- o reforço deve ser pintado de forma a proteger a matriz da acção dos raios ultra-violetas.

Na Figura 2.7 apresenta-se um organigrama que regista, de uma forma resumida, os passos fundamentais numa operação de reforço com CFRP usando a técnica da colagem externa, incluindo os aspectos essenciais para um rigoroso controlo de qualidade da execução do reforço.

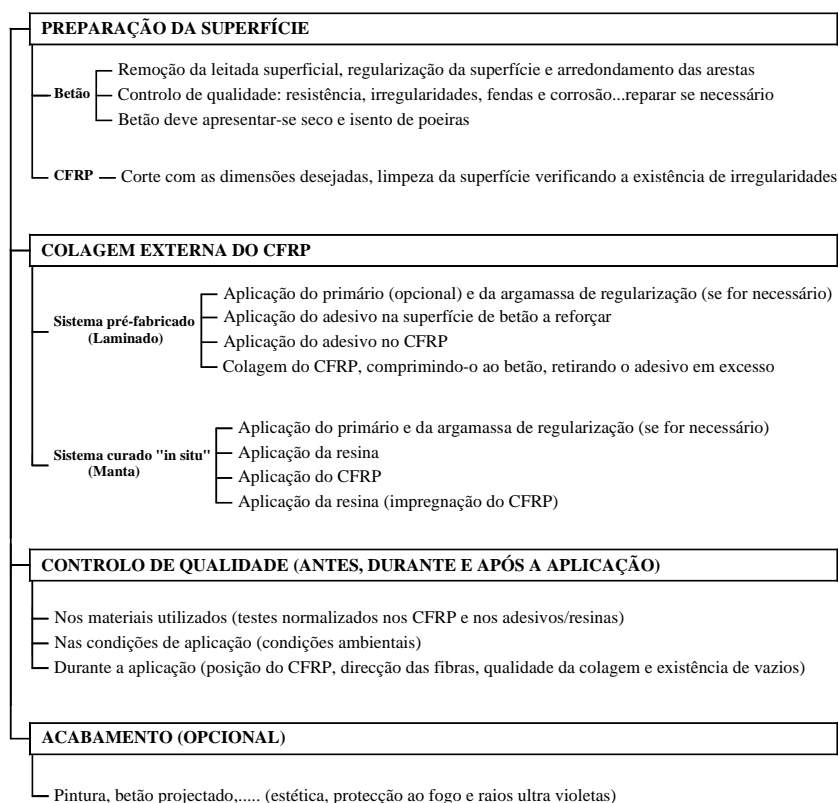


Figura 2.7 - Aplicação da técnica da colagem externa e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias *et al.*, 2006).

De um modo geral, o reforço por colagem externa de CFRP (EBR) está conotado com simplicidade e rapidez de execução, assim como com o facto de proporcionar aumentos consideráveis no desempenho estrutural das peças reforçadas, quer para estados limites de utilização (controlo da fendilhação e da deformação e acréscimo de rigidez) como para estados limites últimos (aumento da capacidade máxima de carga, e em alguns casos, aumento da capacidade deformacional na rotura). Apesar destas importantes mais-valias, à técnica por colagem externa de CFRP estão associados alguns aspectos menos positivos. O primeiro está relacionado com o nível de aproveitamento do CFRP. Os estudos científicos, que já foram realizados para avaliar o comportamento de elementos estruturais de betão armado reforçados com CFRP utilizando a técnica da colagem externa, permitiram constatar a ocorrência frequente de modos de rotura prematuros por descolamento/destacamento do CFRP. A estes modos de rotura estão associados níveis baixos de rendimento do CFRP, ou seja, a tensão máxima instalada no CFRP na rotura da peça reforçada é bastante inferior à resistência à tracção última do CFRP. Este facto torna, desde logo, a solução de reforço menos económica. Associado a isto, registe-se, ainda, o facto dos modos de rotura anteriormente referidos serem frágeis e ocorrerem praticamente sem qualquer tipo de aviso. Neste contexto, e numa tentativa de se evitar ou retardar a ocorrência de modos de ruína prematuros, e, simultaneamente, incrementar a ductilidade e a capacidade de carga última dos elementos reforçados, tem sido proposta a utilização de mecanismos exteriores de fixação do reforço de CFRP (Khalifa, 1999; Dias *et al.*, 2002 e Dimande, 2003).

Outro aspecto característico da técnica de reforço EBR está relacionado com o facto dos CFRP serem colados externamente ao elemento, ficando assim o reforço directamente exposto às condições ambientais. Deste modo, a susceptibilidade ao impacto, aos actos de vandalismo, ao fogo, às temperaturas elevadas, aos raios ultravioletas e à absorção de humidade, é bastante grande, o que exige uma adequada protecção para não ser reduzido o período de vida útil da estrutura reforçada.

De forma a colmatar os aspectos menos positivos identificados à técnica da colagem externa (EBR) surgiu, como alternativa, a técnica de reforço NSM, em que, tal como já anteriormente foi referido, o CFRP, em vez de ser colado externamente nas faces dos elementos estruturais a reforçar, é inserido em entalhes executados no betão de recobrimento.

2.2.2 - A técnica da inserção com CFRP (NSM)

A técnica de reforço NSM com CFRP baseia-se nos seguintes procedimentos:

- Execução do entalhe na face do elemento a reforçar (Figura 2.8-a);
- O entalhe é limpo com a aplicação de ar comprimido (Figura 2.8-b);

- O CFRP é cortado e, posteriormente, limpo com acetona (Figura 2.8-c e Figura 2.8-d);
- O adesivo epoxi é produzido segundo as recomendações do fabricante (Figura 2.8-e);
- O entalhe é preenchido com o adesivo (Figura 2.8-f);
- O adesivo é aplicado nas faces do CFRP (Figura 2.8-g);
- O CFRP é introduzido no entalhe retirando-se o adesivo em excesso (Figura 2.8-h).

Tal como acontece com a técnica EBR, o sucesso da técnica NSM com CFRP e, conseqüentemente, o nível de desempenho do CFRP passa necessariamente pela qualidade com que é realizada a tarefa de execução de reforço. No capítulo 3, quando for feita a descrição da execução dos reforços de CFRP nos modelos ensaiados no âmbito da presente dissertação, será apresentado e descrito um organograma que regista, de uma forma resumida, os passos fundamentais numa operação de reforço com CFRP usando a técnica NSM, incluindo os aspectos essenciais para um rigoroso controlo de qualidade da execução do reforço.

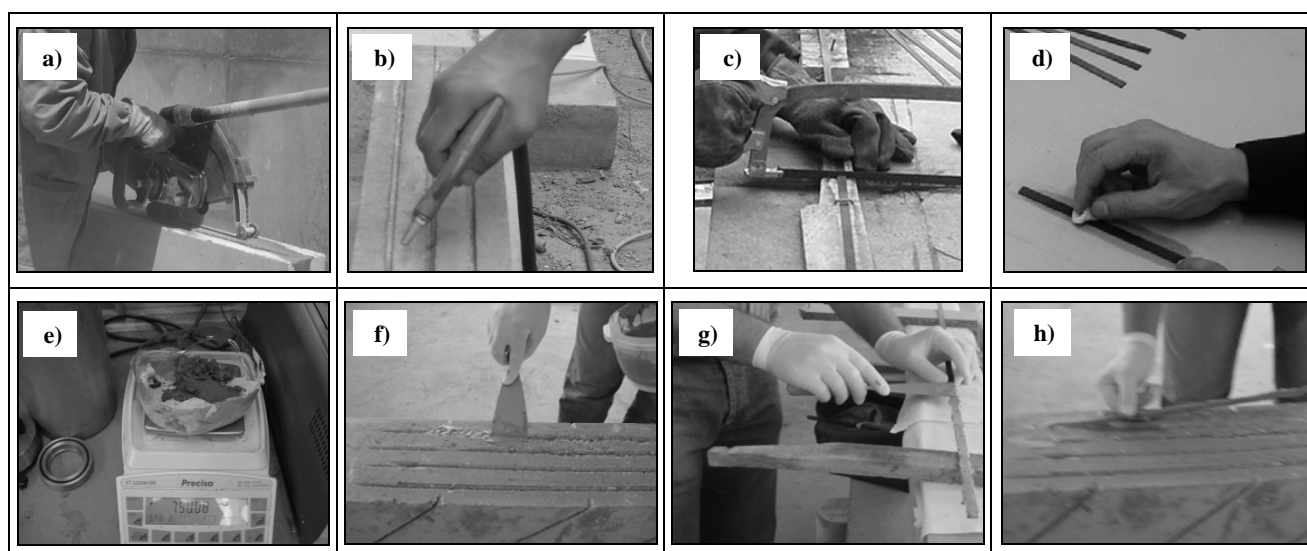


Figura 2.8 - Procedimento para aplicação do reforço com laminados de CFRP inseridos (reforço à flexão).

No passado, o conceito associado à técnica NSM com CFRP já foi aplicado, utilizando, no entanto, varões de aço (Asplund, 1949). A utilização de CFRP, em vez dos varões de aço, apresenta algumas mais-valias resultantes de dois aspectos: os CFRP não têm problemas de corrosão e têm, comparativamente com os varões de aço, um elevado valor da relação entre a resistência à tracção e o peso específico. A não existência do fenómeno da corrosão nos materiais de CFRP, além de melhorar a solução de reforço em termos de durabilidade, permite a execução de entalhes com menor profundidade. O segundo aspecto anteriormente referido origina que as soluções de CFRP, quando comparadas com as soluções em varões de aço, possam ter um menor número de entalhes e/ou entalhes de menores dimensões. Desta forma, resulta uma maior facilidade de instalação, um menor risco de interferir com as armaduras existentes e uma economia no material de colagem.

A técnica de reforço NSM pode ser aplicada usando várias formas de CFRP em termos de secção transversal (Figura 2.9 e Figura 2.10): varões de secção circular (exemplos: $d_b = 7.5$ mm, $d_b = 9.5$ mm e $d_b = 12.7$ mm), de secção quadrada (por exemplo $t_f \times h_f = 10$ mm \times 10mm) e laminados de CFRP (secção rectangular em que uma das dimensões é bastante menor que a outra: como exemplos deste tipo de CFRP existem laminados com dimensões $t_f \times h_f = 1.4$ mm \times 10mm, $t_f \times h_f = 1.2$ mm \times 20mm, $t_f \times h_f = 2$ mm \times 16mm, $t_f \times h_f = 2$ mm \times 20mm). Além dos tipos de CFRP enunciados, e que se distinguem pela forma da respectiva secção transversal, registre-se ainda a existência, com o objectivo de incrementar a aderência da ligação betão-adesivo-CFRP, de varões nervurados e varões contendo uma superfície rugosa. Na Figura 2.10 ilustram-se as várias hipóteses para reforço à flexão usando a técnica NSM, nomeadamente em termos da forma da secção transversal e da área de colagem do CFRP. Além disso, é apresentada uma nomenclatura para definir alguns dos parâmetros associados a esta técnica de reforço, bem como propostas existentes para as dimensões dos entalhes em função do tipo de secção transversal do CFRP.

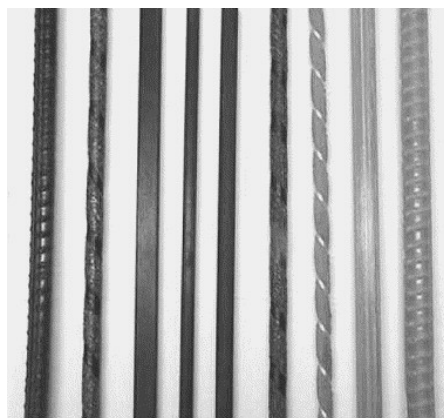


Figura 2.9 - Elementos de CFRP utilizados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007).

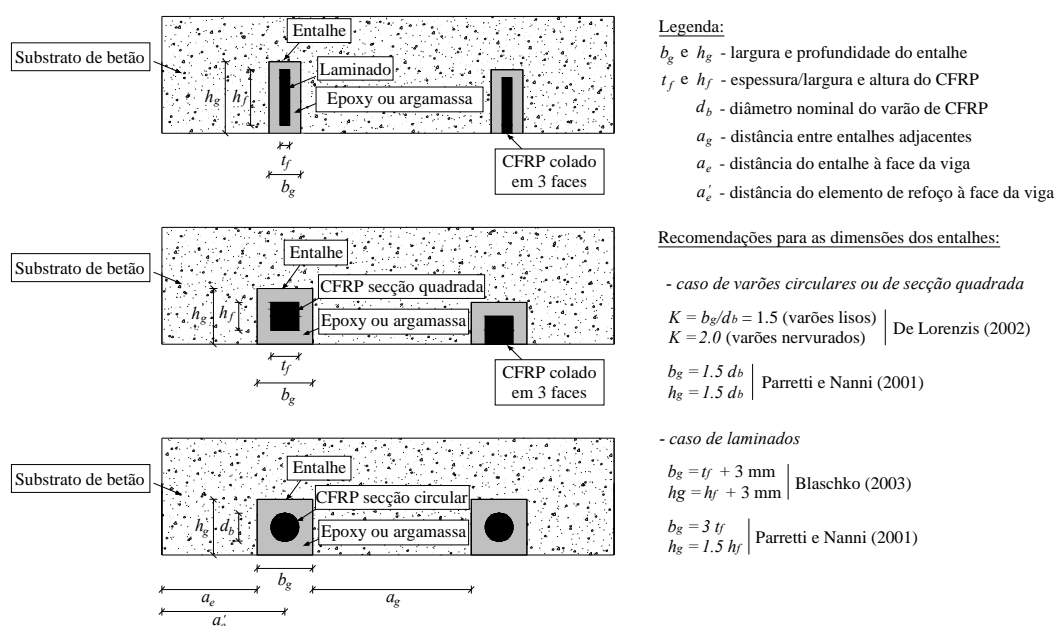


Figura 2.10 - Soluções de reforço com CFRP usando a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007).

Tal como anteriormente se referiu, a técnica NSM começou por ser utilizada recorrendo a varões de aço. Desta forma, com o aparecimento dos CFRP, uma alternativa natural de aplicação da técnica NSM passa simplesmente por proceder à substituição do material (passagem de aço para CFRP), mantendo a forma da secção transversal. No entanto, o recurso a varões de CFRP apresenta alguns aspectos que é preciso ter em conta antes de uma decisão de utilização deste tipo de reforço. Em primeiro lugar existe uma dificuldade da realização dos entalhes com os equipamentos de corte disponíveis no mercado, atendendo à dimensão que os entalhes devem ter por forma a que os varões possam ser inseridos (Figura 2.10). Por exemplo, os varões utilizados na investigação experimental realizada por De Lorenzis e Nanni (2001) tinham um diâmetro efectivo de 9.5 mm e 12.7 mm. Outro aspecto menos favorável em relação à utilização de varões de CFRP é o baixo valor da relação entre a área da superfície colada e a área da secção transversal do varão. El-Hacha e Rizkalla (2004) compararam dois tipos de soluções de reforço de CFRP aplicados recorrendo à técnica de reforço por inserção (NSM): laminados e varões. Os referidos autores concluíram que para modelos com a mesma rigidez axial em termos de reforço de CFRP, a solução com laminados foi mais eficaz que a solução de varões. A solução com laminados proporcionou o máximo aproveitamento do material de reforço, enquanto no caso da solução com varões ocorreu o descolamento/deslizamento do CFRP (rotura prematura). O menor desempenho da solução de varões deveu-se, fundamentalmente, ao facto da área de colagem do varão de CFRP ser baixa, comparativamente com a área de colagem do laminado. Por último, refira-se ainda o facto de à solução com laminados de CFRP estar associada uma zona de ligação ao betão mais uniforme que no caso dos varões de CFRP, o que tem consequência em termos do comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP. Assim, em face das considerações que foram referidas, a forma geométrica dos laminados de CFRP, apesar de ser a que pode exigir maior profundidade do betão de recobrimento, é a mais indicada em termos de potenciar o máximo rendimento do CFRP.

Efectuando uma comparação directa entre as duas técnicas de reforço com CFRP (EBR e NSM) constata-se que, relativamente à técnica EBR, a técnica NSM não requer qualquer preparação da superfície (não é preciso muito mais do que proceder à abertura dos entalhes) e, uma vez que “recorre” ao betão de recobrimento em vez do betão superficial, está-lhe associada uma probabilidade maior do betão apresentar melhor qualidade. Este facto é de crucial importância em técnicas de reforço em que a aderência entre o betão e o CFRP tem um papel determinante no desempenho das soluções de reforço. Por outro lado, estando o reforço inserido no betão de recobrimento, e não colado externamente, fica mais protegido contra acções mecânicas, desgaste, impacto e vandalismo. Além disso, relativamente à solução por colagem exterior, a técnica NSM confere melhor protecção do reforço de CFRP numa eventualidade de este ser submetido temperaturas elevadas.

O melhor desempenho estrutural do CFRP aplicado segundo a técnica NSM é facilmente perceptível quando se compara, por exemplo, a área de colagem do mesmo laminado de CFRP aplicado segundo a técnica NSM e aplicado segundo a técnica EBR. Com efeito, por intermédio da técnica NSM, a área de colagem do laminado é dupla da mobilizada na técnica de reforço EBR, o que permite aumentar o grau de fixação do laminado ao betão (ancoragem), mobilizando-se tensões mais elevadas no CFRP aquando da rotura do elemento reforçado. Uma visão qualitativa deste facto pode ser observada na Figura 2.11. A duplicação da área de colagem, anteriormente referida, pode viabilizar a aplicação do reforço de CFRP em estruturas em que o betão apresente uma classe de resistência baixa (ao alargamento da área de colagem está associado um aumento da aderência). A maior eficácia da técnica NSM em relação à técnica EBR em termos de reforço à flexão foi comprovada em vários trabalhos experimentais (Blaschko *et al.*, 1999; El-Hacha e Rizkalla, 2004; Barros *et al.*, 2005).

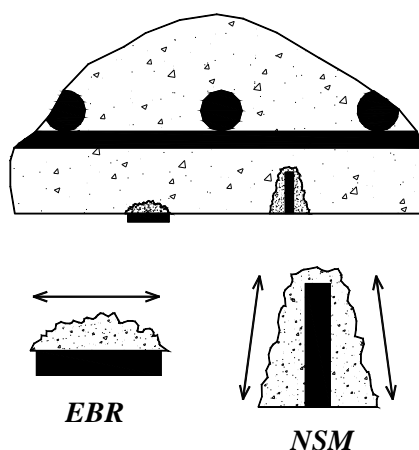


Figura 2.11 - Grau de ancoragem conferido pela técnica EBR e pela técnica NSM (adaptado de Carolin (2003)).

Como vantagens da técnica NSM em relação à técnica EBR podem ainda ser referidas as seguintes:

- facilidade de conferir ao reforço de CFRP um mecanismo de prevenção de roturas prematuras (roturas que inviabilizam um total aproveitamento do material de reforço) por intermédio da ancoragem do CFRP aos elementos estruturais adjacentes;
- pelo facto do reforço de CFRP ficar inserido no betão de recobrimento, e não colado na face externa do elemento a reforçar, a técnica NSM é vocacionada para o reforço à flexão para momentos negativos;
- a técnica NSM é a mais vocacionada para soluções que envolvam a aplicação de pré-esforço no CFRP (Nordin e Taljsten, 2006).

As várias mais-valias que se enunciaram em relação à técnica NSM, nomeadamente a que recorre a laminados de CFRP, fazem com que seja em muitos casos uma técnica mais eficaz que a técnica da colagem externa sendo assim uma alternativa viável à técnica EBR (usada em substituição da técnica

EBR ou aplicada em combinação com a técnica EBR). Para tal, é apenas necessário que as armaduras dos elementos estruturais a reforçar tenham o recobrimento necessário para alojar o CFRP.

Em Portugal a aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço de estruturas de betão tem vindo a ser estudada no Departamento de Engenharia da Universidade do Minho (Barros *et al.*, 2003 e Barros *et al.*, 2007) no âmbito do reforço à flexão de pilares (Figura 2.12a), vigas (Figura 2.12b) e lajes (Figura 2.12c) e da avaliação da aderência betão-adesivo-CFRP (Figura 2.12d). Além disso, e no âmbito da presente dissertação tem sido desenvolvida investigação na aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado.

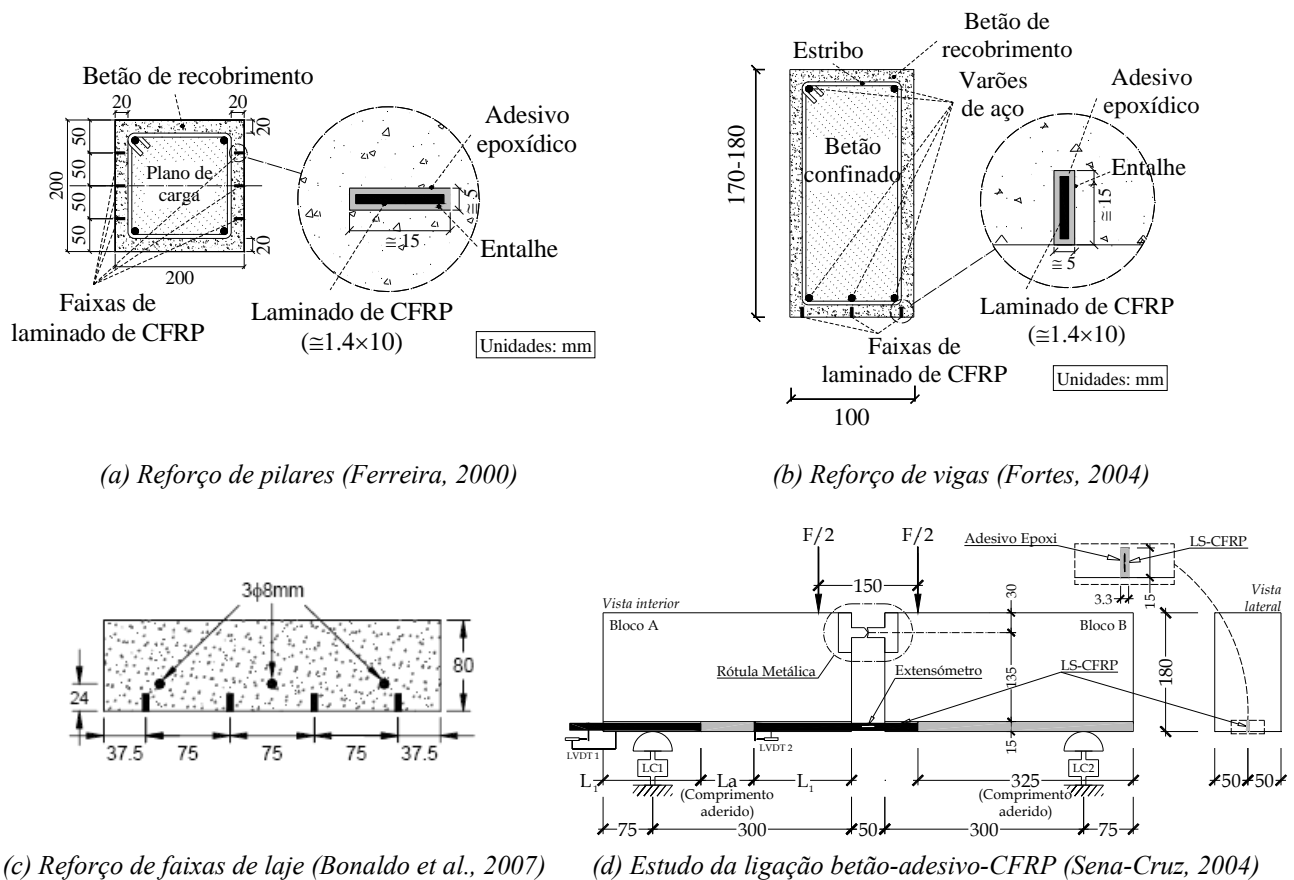


Figura 2.12 - Investigação realizada na Universidade do Minho no âmbito do reforço de estruturas de betão usando a técnica NSM com laminados de CFRP.

No trabalho experimental realizado por Ferreira (2000), três séries de elementos de pilar de betão armado foram ensaiadas sob compressão axial constante e carga horizontal cíclica crescente (Figura 2.13). A série SR era composta por pilares não reforçados, a série PR era constituída por pilares que foram reforçados antes de serem ensaiados, e a série CR era composta pelos pilares ensaiados da série SR, reforçados posteriormente e ensaiados novamente. Para cada série de elementos de pilar foram testadas duas soluções para a quantidade de armadura longitudinal: $4\phi 10$ e $4\phi 12$. O pilar foi submetido a uma carga vertical constante de 150 kN que introduzia no pilar uma tensão de compressão de 3.75 MPa. O carregamento era constituído por oito ciclos de deslocamentos

desde ± 2.5 mm até ± 20.0 mm, em incrementos de ± 2.5 mm, à velocidade de deformação de $150 \mu\text{m/s}$ (Ferreira, 2000).

Tomando por base de comparação os resultados obtidos na série de pilares não reforçados (série SR), constatou-se que o reforço proporcionou um aumento significativo da capacidade de carga dos pilares, tal como se pode verificar na Figura 2.14. Como a percentagem de CFRP foi mantida constante em todo o programa de ensaios, o aumento da capacidade de carga foi maior nos pilares com menor percentagem de armadura convencional. O aumento de capacidade de carga nos pilares da série PR e da série CR foi similar. Na maior parte dos pilares reforçados, valores de extensão próximos da extensão última do CFRP ($\cong 1.1\%$) foram registados em vários CFRP, tendo alguns rompido junto à fenda de rotura do pilar.

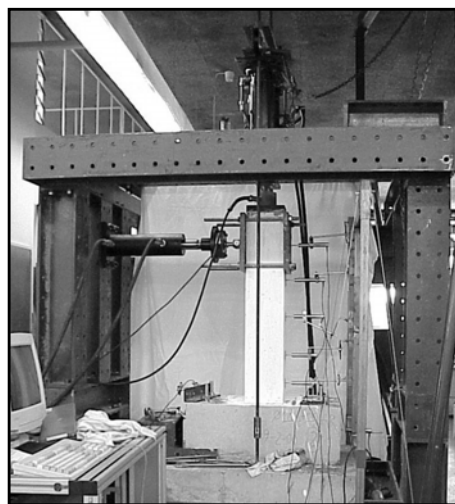
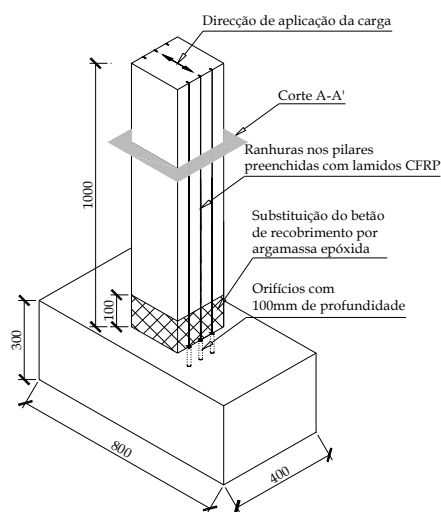


Figura 2.13 - Aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço de elementos de pilar de betão armado: inserção de seis laminados, três em cada face traccionada (dimensões em milímetros) (Ferreira, 2000).

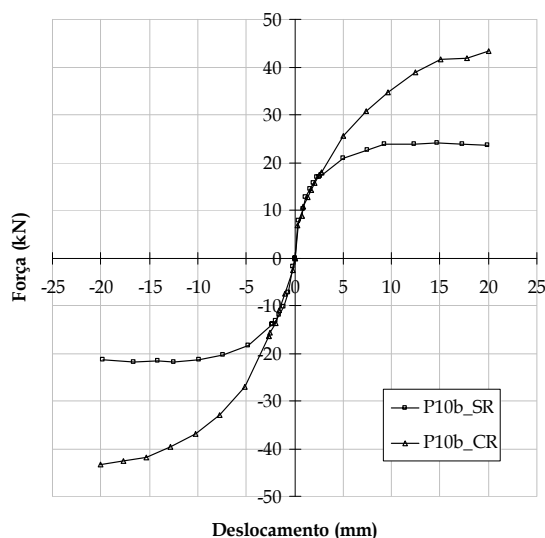


Figura 2.14 - Envoltória força vs deslocamento de todos os carregamentos cíclicos no pilar P10b com $4\phi 10$ longitudinais (SR - sem reforço; CR - com reforço) (Ferreira, 2000).

Em termos do reforço à flexão de vigas de betão armado, Fortes *et al.* (2002) aplicaram a técnica NSM com laminados de CFRP com o objectivo de duplicar a capacidade de carga de vigas de betão armado com rotura por flexão. Na Figura 2.15 apresentam-se os dados que caracterizam os modelos das séries de vigas ensaiadas. A área da secção transversal dos CFRP (A_f) aplicados em cada série foi determinada por forma a duplicar a carga de rotura das correspondentes vigas de referência. A percentagem de estribos utilizada foi a necessária para assegurar rotura por flexão. Na Figura 2.15, A_s é a área da secção transversal dos varões de aço dispostos na face inferior da viga. Fortes *et al.* (2002) verificaram que o objectivo de duplicar a carga última (F_{max}) das correspondentes vigas de referência foi praticamente alcançado. Concretamente, os aumentos verificados em F_{max} foram de 78% a 98%. A carga correspondente ao início da cedência das armaduras de aço, F_{sy} , aumentou de 32% a 47%. O valor da flecha central correspondente à carga F_{sy} também aumentou. O aumento na carga de início da fendilhação, F_{cr} , foi bastante significativo. Para a carga de serviço (carga para a flecha de $l/400 = 3.75$ mm, em que l é o vão da viga), F_{serv} , registou-se um aumento máximo de 45%. Os valores máximos de extensão no compósito ($\varepsilon_{f, max}$) variaram de 62% a 91% da extensão última do CFRP (1.7%). O desempenho do reforço de CFRP adoptado pode ser avaliado por intermédio dos valores apresentados na Tabela 2.3.

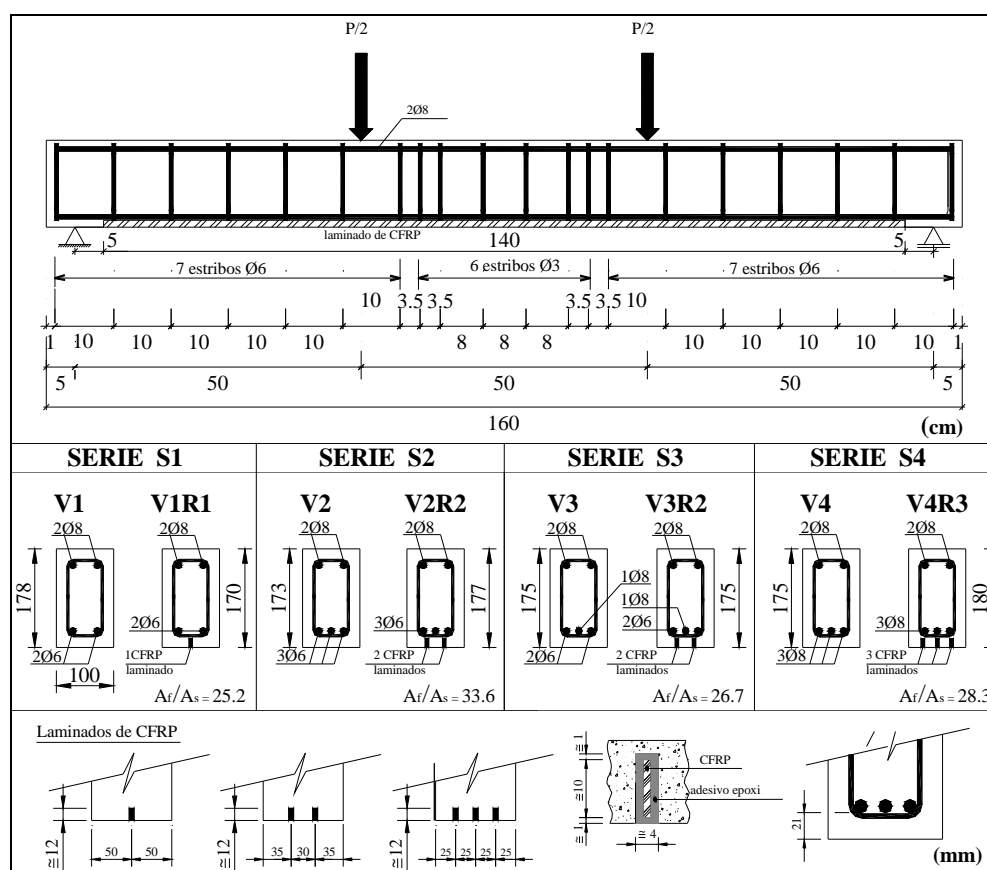


Figura 2.15 - Aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado (dimensões em milímetros) (Fortes *et al.*, 2002).

Tabela 2.3 - Desempenho do reforço de CFRP (Fortes *et al.*, 2002).

Série	$\frac{F_{cr}(VR)^*}{F_{cr}(V)}$	$\frac{F_{serv}(VR)^*}{F_{serv}(V)}$	$\frac{F_{sy}(VR)^*}{F_{sy}(V)}$	$\frac{F_{max}(VR)^*}{F_{max}(V)}$	$\mathcal{E}_{f, max}$ [%]
S1	1.26	1.22	1.32	1.78	1.55
S2	1.52	1.45	1.39	1.91	1.28
S3	1.51	1.38	1.36	1.98	1.28
S4	1.74	1.25	1.47	1.96	1.06

* VR - Viga reforçada; V - Viga de referência.

Na Figura 2.16 apresentam-se, a título de exemplo, os diagramas de carga vs deslocamento a meio vão das vigas da série S2 onde são visíveis os benefícios obtidos pela presença do CFRP, anteriormente assinalados. A curva de comportamento da viga com CFRP é a típica num elemento flectido com reforço à flexão com CFRP. Conforme se pode observar apresenta quatro estados de comportamento, isto é, a fase de betão não fendilhado (até ao início de fendilhação do betão), a fase de betão fendilhado com aço não plastificado (entre o início da fendilhação no betão e a cedência das armaduras longitudinais); a fase de betão fendilhado após a cedência das armaduras do aço e a fase em que ocorre o deslizamento do reforço de CFRP.

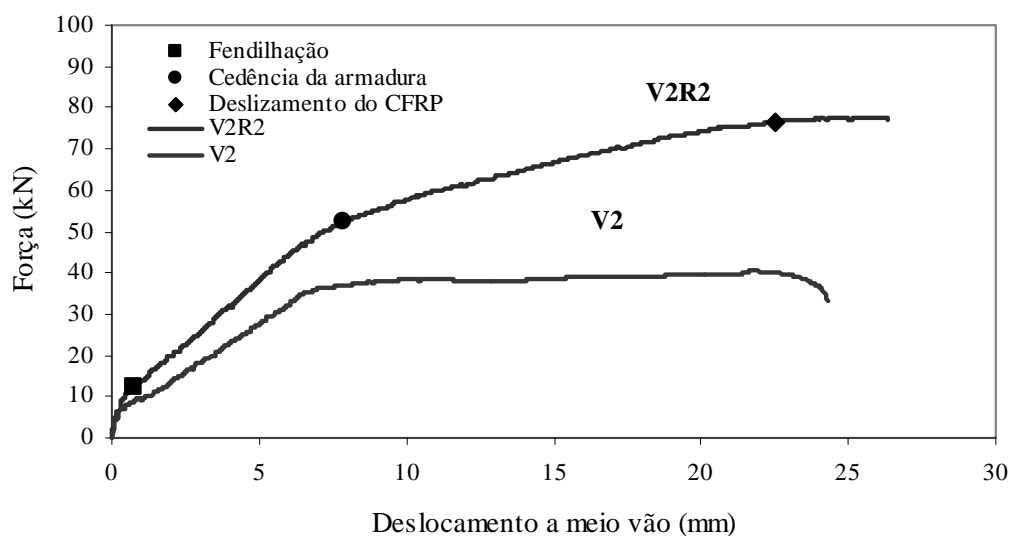


Figura 2.16 - Diagramas de carga vs deslocamento a meio vão das vigas da série S2 (Fortes *et al.*, 2002).

Bonaldo *et al.* (2007) efectuaram ensaios em faixas de laje de betão armado reforçadas à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP (Figura 2.12c) de forma a ser avaliada a influência da percentagem de CFRP e da classe de resistência do betão. Para cada uma das classes de resistência de betão utilizadas (C12/15, C35/45 e C50/60) foram ensaiadas cinco faixas de laje: uma sem qualquer reforço de CFRP e quatro reforçadas com CFRP e que se distinguiam pela percentagem de

CFRP que continham (0.06% - 1 laminado de CFRP, 0.13% - 2 laminados de CFRP, 0.25% - 4 laminados de CFRP (Figura 2.12c) e 0.50% - 8 laminados de CFRP). Tomando como base o comportamento das faixas de laje sem CFRP, os autores constataram que os CFRP permitiram aumentos consideráveis da carga de serviço (23% até 162%), da carga correspondente à cedência das armaduras longitudinais (26% até 238%) e da carga máxima (170% para a série com betão C12/15, 338% para a série com betão C35/45 e 335% para a série com betão C50/60). Os modos de rotura observados e, consequentemente, o grau de eficácia do reforço de CFRP foram condicionados pela classe de resistência do betão. Para a classe C12/15, com a exceção da laje com a menor percentagem de CFRP, onde se registou a rotura do CFRP, o modo de rotura típico foi o esmagamento do betão. Para as classes de resistência C35/45 e C50/60 o modo de rotura típico foi a rotura do CFRP (as exceções foram as faixas de laje correspondentes à máxima percentagem de CFRP, tendo ocorrido esmagamento do betão no caso da laje com betão C35/45 e rotura por corte no caso da laje com betão C50/60).

Os resultados obtidos por Ferreira (2000), Fortes *et al.* (2002) e Bonaldo *et al.* (2007), tal como outros trabalhos que têm vindo a ser desenvolvidos pela comunidade científica internacional no âmbito do reforço à flexão (Blaschko *et al.*, 1999; El-Hacha e Rizkalla, 2004; Kotynia, 2007) indicam que a técnica proposta é mais eficaz que as baseadas na colagem externa de CFRP, dado que a precocidade da descolagem do CFRP é retardada, sendo mesmo evitada em muitos casos, resultando níveis de extensão nos CFRP e aumentos na capacidade de carga dos elementos reforçados mais elevados que os geralmente reportados quando se utiliza a técnica de reforço por colagem externa. Nos elementos de viga e de laje, além do aumento da capacidade de carga, também se registou, em alguns casos, um aumento significativo da sua capacidade deformacional no momento da sua rotura, indicador da eficácia da presente técnica de reforço em termos de promover roturas mais dúcteis. Além disso, o reforço de CFRP aplicado segundo a técnica NSM proporcionou um aumento do valor da carga correspondente à cedência das armaduras longitudinais e um aumento da rigidez a partir do início de fendilhação.

Por outro lado, a investigação experimental realizada até ao momento permite verificar que os parâmetros que condicionam a eficiência do reforço à flexão aplicado segundo a técnica NSM, e consequentemente os modos de rotura dos elementos reforçados, são a geometria do elemento, a percentagem de armadura longitudinal, a percentagem de CFRP, a classe de resistência do betão, o tipo de carregamento, o espaçamento entre laminados adjacentes (ver Figura 2.10) e a distância do laminado à face do elemento a reforçar (ver Figura 2.10).

2.2.3 - Comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP (técnica NSM)

Os modos de rotura que se podem observar em elementos de betão reforçados com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento são de dois tipos. O primeiro, os convencionais, que incluem o esmagamento do betão ou a rotura do CFRP, geralmente após a cedência das armaduras longitudinais. Um outro modo de rotura está associado ao destacamento prematuro do CFRP. Com efeito, apesar de não ter consequências tão gravosas, em termos do rendimento do CFRP, como acontece no caso da colagem externa, este modo de rotura pode também ocorrer na técnica NSM. Segundo De Lorenzis e Teng (2007), a ocorrência deste tipo de rotura prematura e a sua consequência em termos de rendimento do CFRP depende de factores como a percentagem de armadura longitudinal, a percentagem de CFRP, a forma da secção transversal do CFRP, a superfície do CFRP e a resistência à tracção quer do adesivo como do betão. Além disso, De Lorenzis e Teng (2007) referem que a rotura por destacamento prematuro do CFRP pode ocorrer de várias formas: i) na interface CFRP/adesivo, ii) na interface adesivo/betão e iii) pelo destacamento do betão de recobrimento.

Em face do que se acabou de referir, conclui-se que um dos aspectos cruciais no desempenho da técnica NSM relaciona-se com o comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP. Na Tabela 2.4 apresentam-se os principais dados dos ensaios de aderência realizados com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento. Sena-Cruz e Barros (2002) realizaram ensaios de arranque à flexão do tipo do esquematizado na Figura 2.12d, enquanto Blaschko (2003) e Teng *et al.* (2006) realizaram ensaios de arranque directo (Figura 2.17).

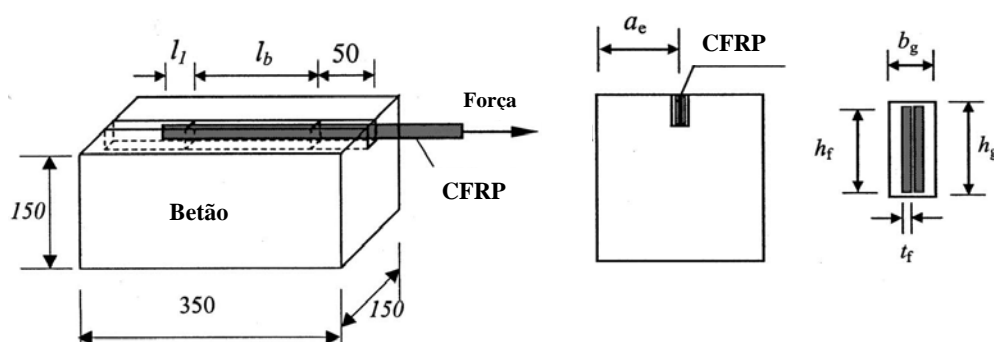


Figura 2.17 - Ensaio de arranque directo com laminados de CFRP inseridos (Teng *et al.*, 2006).

Os principais resultados dos ensaios experimentais anteriormente referenciados encontram-se registados na Tabela 2.4 e a sua análise permite avançar com as seguintes conclusões:

- a força máxima de arranque aumenta com o aumento do comprimento de colagem do laminado, conforme pode ser observado na Figura 2.18;

- o valor máximo da tensão média de aderência diminui com o aumento do comprimento de colagem do laminado, em resultado de uma distribuição não uniforme das tensões de corte na interface CFRP-betão;
- os modos de rotura observados estão associados à cedência da ligação (na interface laminado-adesivo ou na interface adesivo-betão);
- os valores máximos das tensões médias de corte que a técnica NSM com laminados de CFRP permite mobilizar (10-20 MPa) são significativamente superiores aos registados com a técnica da colagem externa com compósitos de CFRP ou com a técnica NSM usando varões (De Lorenzis, 2002).

Tabela 2.4 - Ensaio para caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP.

	Sena-Cruz e Barros (2002)	Blashko (2003)	Teng <i>et al.</i> (2006)
Provete	Vigas da Rilem para ensaios de arranque	Bloco de betão com 300×300×1100 mm	Bloco de betão com 150×150×350 mm
Tipo de ensaio	Arranque em flexão	Arranque directo	Arranque directo
Resistência à compressão do betão (MPa)	35, 45 e 70	32 e 46	29 (cubos)
Resistência à tracção directa do adesivo (MPa)	16-22	33.3	42.6
Dimensões dos laminados (mm)	1.5×9.6	(1.2-2)×20	(2x2)×16 2 laminados (2x16) colados
Parâmetros avaliados	Comprimento de colagem do CFRP e tipo de betão	Comprimento de colagem do CFRP, tipo de betão, tipo de CFRP e betão de recobrimento lateral	Comprimento de colagem (200 e 250 mm)
Modos de rotura	Rotura por cedência da ligação	Rotura por cedência da ligação adesivo/CFRP e rotura do betão de recobrimento lateral	Rotura por cedência da ligação adesivo/CFRP
Tensão de aderência (MPa)	19.8 (deslizamento de 0.25 mm)	20.0	10-12 (deslizamento de 0.2-0.3 mm)

A lei tipo de comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP em elementos reforçados com CFRP aplicado segundo a técnica NSM está representada na Figura 2.19 (Borchert e Zilch, 2007). Esta lei, resultante dos ensaios de aderência com laminados de CFRP aplicados usando a técnica NSM, é estabelecida com base na relação *tensão de aderência vs deslizamento*. A curva de comportamento representada apresenta alguns pontos notáveis. O ponto II, a partir do qual a ligação deixa de ter um comportamento linear devido ao início do comportamento não linear do adesivo, ocorre para um valor da tensão de aderência correspondente a 30%-50% do valor da tensão máxima de aderência (a

partir deste ponto o ganho de aderência é não linear). O ponto III corresponde à tensão máxima de aderência. A partir deste ponto os danos na ligação são suficientemente intensos para produzir uma diminuição da tensão de corte com o aumento do deslizamento do CFRP em relação ao betão envolvente.

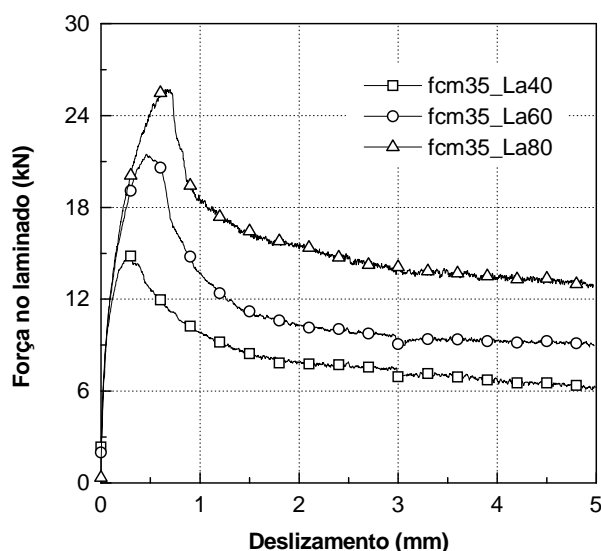


Figura 2.18 - Influência do comprimento de aderência (La) na relação força de arranque vs deslizamento: La = 40 mm, 60 mm e 80 mm (Sena-Cruz e Barros, 2002).

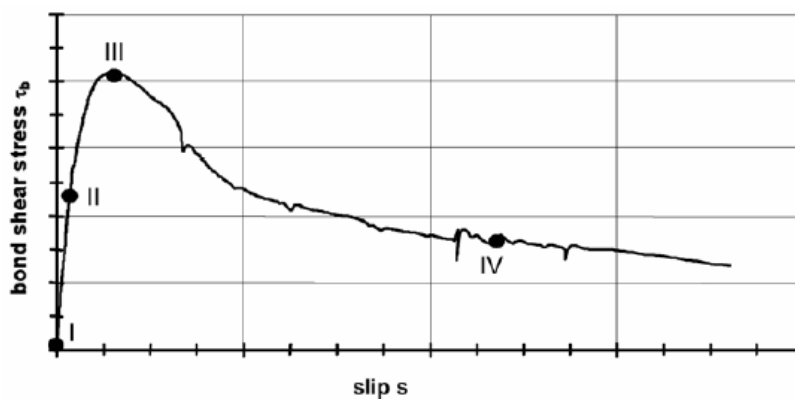


Figura 2.19 - Relação tensão de aderência vs deslizamento (Borchert e Zilch, 2007).

Teng *et al.* (2006), além dos ensaios de aderência referenciados na Tabela 2.4, testaram vigas de betão armado, à flexão em quatro pontos de carga, com o objectivo de avaliar a influência do comprimento de colagem do laminado de CFRP na eficácia da técnica NSM. Desta forma, os referidos autores quiseram efectuar uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos ensaios de aderência com os resultados obtidos nos testes à flexão das vigas. A campanha de ensaios à flexão englobou cinco vigas de betão armado com três metros de vão e os pontos de carga estavam afastados, relativamente ao eixo da viga, 300 mm. As vigas tinham uma secção transversal rectangular (150mm×300mm) e estavam armadas longitudinalmente com 2 ϕ 12 na face traccionada. A

rotura por corte foi evitada com a adopção de estribos $\phi 8$ afastados de 100mm. Das cinco vigas ensaiadas, uma era de referência, sem qualquer tipo de reforço de CFRP, e as restantes cinco foram reforçadas à flexão por intermédio da inserção de um CFRP com dimensões de 4×16 mm (obtido por colagem de dois laminados de 2×16 mm) num entalhe efectuado no betão de recobrimento (30 mm) com as dimensões de 8×22 mm. As quatro vigas distinguiram-se pelo comprimento de colagem do laminado: 500 mm na viga B500, 1200 mm na viga B1200, 1800 mm na viga B1800 e 2900 mm na viga B2900. Os laminados foram colocados de forma a garantir simetria em relação ao centro da viga. Afim evitar que a rotura ocorresse num dos vãos de corte foram aí coladas externamente mantas de CFRP em forma de U.

Na Tabela 2.5 apresentam-se os principais resultados deste programa experimental. A carga de rotura da viga B500 (47.8 kN) foi ligeiramente inferior à da viga de referência e verificou-se que, face a esta, não houve qualquer tipo de acréscimo de rigidez. Esta constatação está naturalmente associada ao facto das extremidades do reforço de CFRP não alcançar sequer os pontos de carga (enquanto a distância entre os pontos de carga era de 600 mm o comprimento do laminado era 500 mm). O modo de rotura desta viga foi o destacamento do reforço com betão adjacente, tendo o destacamento iniciado nas extremidades do CFRP. O reforço aplicado na viga B1200 permitiu um aumento de rigidez, da carga de cedência das armaduras longitudinais e da carga de rotura (63.1 kN). Com o aumento do comprimento de amarração do reforço (passagem de 1200 mm da viga B1200 para 1800 mm da viga B1800), os benefícios verificados na viga B1800 (carga máxima de 91.7 kN) foram superiores aos verificados na viga B1200. O modo de rotura das vigas B1200 e B1800 foi similar ao da viga B500 (separação do betão de recobrimento a partir da secção correspondente à extremidade do CFRP). A carga máxima da viga B2900 foi de 99.8 kN e a rotura ocorreu pelo esmagamento do betão, seguido do destacamento do CFRP a partir da secção de momento máximo (situação diferente ao verificado nas vigas B500, B1200 e B1800). O aumento do comprimento do CFRP de 500 mm para 2900 mm proporcionou um aumento do rendimento do CFRP (de 17% para 71%). Nenhuma das soluções testadas originou a rotura do CFRP.

Teng *et al.* (2006) verificaram que nas vigas B500 e B1200 as tensões de corte registadas tinham valores inferiores aos obtidos nos ensaios de aderência. Por seu lado, nas vigas B1800 e B2900 os valores registados nas tensões de corte foram iguais ou superiores aos dos ensaios de aderência. Uma das constatações mais relevantes deste estudo relaciona-se com o facto dos modos de rotura por destacamento observados nos ensaios das vigas (destacamento do betão de recobrimento contendo o CFRP) divergirem dos modos de rotura por destacamento observados nos ensaios de aderência (cedência da ligação adesivo-CFRP). Segundo Teng *et al.* (2006) a referida divergência é fundamentada nas seguintes razões: o aparecimento das fendas de flexão e flexão-corte, que surgiram

nos modelos de viga, alteram o comportamento da ligação (aderência); a curvatura da viga; o aparecimento de fendas inclinadas associadas à transferência de tensões entre o CFRP e o betão (fendas inclinadas na zona da ligação), fenómeno este que não ocorreu nos ensaios de aderência. Desta forma conclui-se que existem condicionalismos à aplicação directa dos resultados dos ensaios de aderência, anteriormente referidos, na previsão do comportamento da ligação em vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM.

Tabela 2.5 - Principais resultados dos ensaios realizados em vigas (Teng *et al.*, 2006).

Modelos de vigas	F_{max} [kN]	Acréscimo de carga [%]	Extensão máxima no CFRP [%] *	Tensão máxima de corte [MPa]
B0	48.4	-	-	-
B500	47.8	-1	0.23	6
B1200	63.1	30	0.37	6
B1800	91.7	90	0.73	10
B2900	99.8	106	0.97	8

* O valor da extensão última dos laminados era de 1.37%.

Além das considerações que já foram referidas em relação à caracterização do comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP no âmbito da técnica NSM com laminados de CFRP, outra constatação verificada em alguns trabalhos experimentais realizados está relacionada com o facto do comportamento da referida ligação ser substancialmente diferente do registado no âmbito da técnica da colagem externa com CFRP (Teng *et al.*, 2006; Oehlers *et al.*, 2007; Borchert e Zilch, 2007). A diferença assinalada regista-se não só em termos do comportamento da ligação colada quando se analisa o caso de um único laminado (único entalhe), mas também quando se analisa o comportamento da ligação num cenário em que há uma proximidade grande entre laminados adjacentes (entalhes adjacentes). Este último aspecto foi objecto de análise por parte de Rashid *et al.* (2008) no programa experimental que efectuaram e que foi direccionado para a avaliação da influência de dois parâmetros no comportamento da ligação colada betão-adesivo-CFRP. Um relaciona-se com a distância entre laminados adjacentes (solução de reforço que contenha mais que um laminado e em que se verifica proximidade entre laminados adjacentes). Este parâmetro foi avaliado com laminados aplicados segundo a técnica NSM e com laminados aplicados segundo a técnica EBR (Figura 2.20a). O outro parâmetro avaliado, apenas para a técnica NSM, diz respeito ao recobrimento lateral do CFRP (Figura 2.20b). O tipo de ensaio adoptado foi o de arranque directo e o provete de betão utilizado tinha as dimensões representadas na Figura 2.20. O comprimento de colagem dos laminados de CFRP considerado foi de 350 mm. Na Figura 2.20 e nas Tabelas 2.6 e 2.7 apresentam-se os dados gerais do programa experimental em análise.

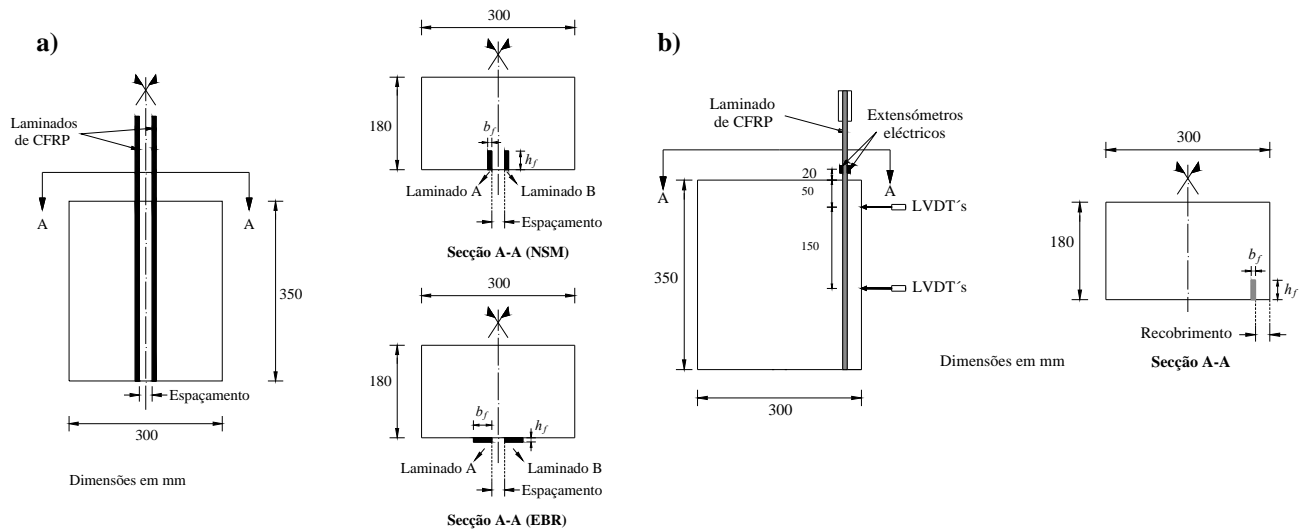


Figura 2.20 - Ensaios realizados por Rashid *et al.* (2008).

Tabela 2.6 - Ensaios para caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP (comparação NSM vs EBR).

Modelo	Técnica de reforço	Espaçamento dos laminados [mm]*	Carga máxima [kN]	Máxima extensão no CFRP [$\mu\epsilon$]	Modo de rotura**
G0NSM	NSM	-	63	13305	DL
G30NSM	NSM	30	102.3	11143	DP
G40NSM	NSM	40	124.3	13447	DP
G50NSM	NSM	50	118.5	12685	DP
G70NSM	NSM	70	135.5	14626	DL
G0EB	EBR	-	11.9	2741	DL
G30EB	EBR	30	26.0	3013	DL
G40EB	EBR	40	21.1	2453	DL
G50EB	EBR	50	21.4	2483	DL
G60EB	EBR	60	24.0	3120	DL

* Os laminados tinham dimensões de $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$. ** DL - Destacamento de um laminado; DP - Destacamento de um plano contendo os dois laminados+betão entre laminados + betão lateral (Figura 2.22).

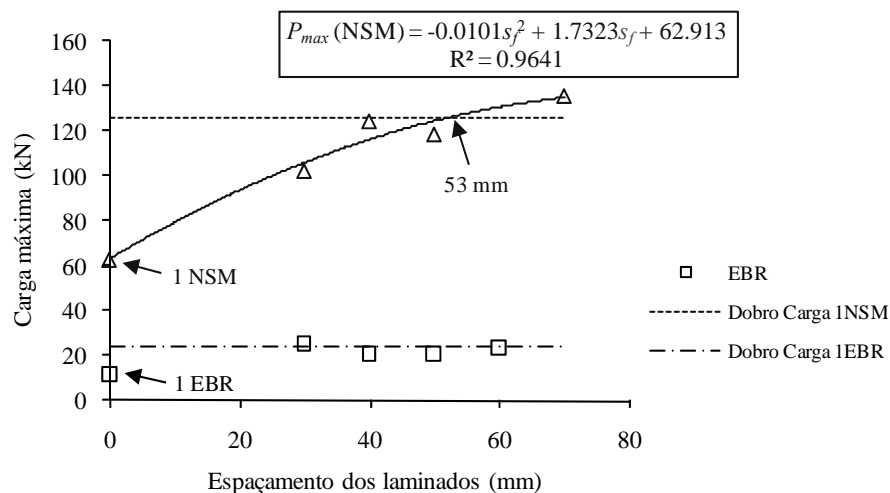


Figura 2.21 - Eficácia da técnica NSM vs EBR e influência da distância entre laminados adjacentes (adaptado de Rashid *et al.*, 2008).

Analisando os dados da Tabela 2.6 e a Figura 2.21 é possível retirar as seguintes conclusões:

- o valor da carga máxima do modelo com um laminado inserido foi 5.3 vezes superior ao valor da carga máxima do modelo com um laminado colado externamente. O valor médio da carga máxima dos modelos com dois laminados inseridos foi cerca de 5.2 vezes superior ao valor médio da carga máxima dos modelos com dois laminados aplicados segundo a técnica EBR;
- o valor médio da extensão máxima atingida nos modelos com laminados aplicados segundo a técnica NSM foi cerca de 4.7 vezes superior ao valor médio da extensão máxima atingida nos modelos com laminados aplicados segundo a técnica EBR;
- os resultados obtidos pelos modelos com laminados aplicados segundo a técnica EBR permitem concluir que não existe interacção entre laminados adjacentes. Os valores da carga máxima para os vários espaçamentos dos laminados são semelhantes e, em média, o seu valor corresponde a 1.94 vezes o valor da carga máxima do modelo que contem apenas um laminado. Refira-se que nos modelos com dois laminados colados externamente ocorreu primeiro o destacamento de um dos laminados e, posteriormente, é que ocorreu o destacamento do segundo laminado. A carga máxima foi atingida imediatamente antes de ocorrer o destacamento do primeiro laminado.
- a análise das cargas máximas registadas nos modelos com laminados aplicados segundo a técnica NSM permite constatar que, ao contrário do que aconteceu nos modelos com laminados aplicados usando a técnica EBR, existe uma interacção entre laminados adjacentes. Conforme se pode verificar na Figura 2.21, para espaçamentos inferiores a 53 mm pode ocorrer uma penalização da eficiência do reforço. Esta ocorrência está directamente relacionada com o modo de rotura que ocorreu nos modelos com dois laminados aplicados com a técnica NSM. À excepção do modelo com a maior distância entre laminados (G70NSM), o modo de rotura ocorreu pelo destacamento de um bloco contendo os dois laminados, o betão entre laminados e betão adjacente às faces exteriores dos dois laminados (Figura 2.22). No modelo com apenas um laminado e no modelo contendo dois laminados espaçados de 70 mm a rotura ocorreu de modo semelhante (cedência do laminado, o qual continha betão adjacente).

Tomando como base os elementos da Tabela 2.7 e da Figura 2.23, Rashid *et al.* (2008) concluíram que:

- o valor da espessura do betão de recobrimento lateral é um parâmetro que condiciona a eficácia da técnica NSM;
- para espessuras do betão de recobrimento lateral inferiores a 3.5 vezes o valor da altura dos laminados (h_f - ver Figura 2.20), existe uma penalização na eficácia da técnica NSM. Como nota adicional, refira-se que este valor é bastante mais conservador do que o proposto por Blashko (2003). Este autor recomenda para a'_e (ver Figura 2.10) 30 mm ou a maior dimensão do agregado.

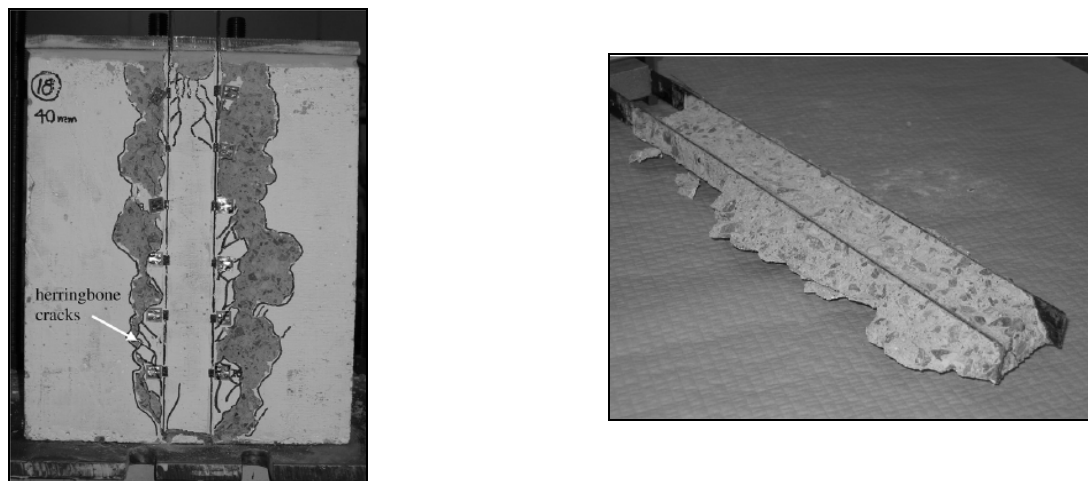


Figura 2.22 - Influência da distância entre laminados adjacentes no modo de rotura (Rashid *et al.*, 2008).

Tabela 2.7 - Ensaios para caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP (efeito do recobrimento lateral).

Modelo	Recobrimento lateral [mm]	Dimensão dos laminados [mm]	Carga máxima [kN]	Máxima extensão no CFRP [$\mu\epsilon$]
C150NSMa	150	1.4x20	63	13360
C10NSMa	10	1.4x20	22.2	4984
C20NSMa	20	1.4x20	33.8	7578
C30NSMa	30	1.4x20	40.6	8950
C40NSMa	40	1.4x20	50.2	10880
C60NSMa	60	1.4x20	59.2	12710
C85NSMa	85	1.4x20	75.7	16400
C150NSMb	150	2.4x40	205.1	11880
C50NSMb	50	2.4x40	119.9	7340
C75NSMb	75	2.4x40	170.9	10710
C100NSMb	100	2.4x40	194.9	11410

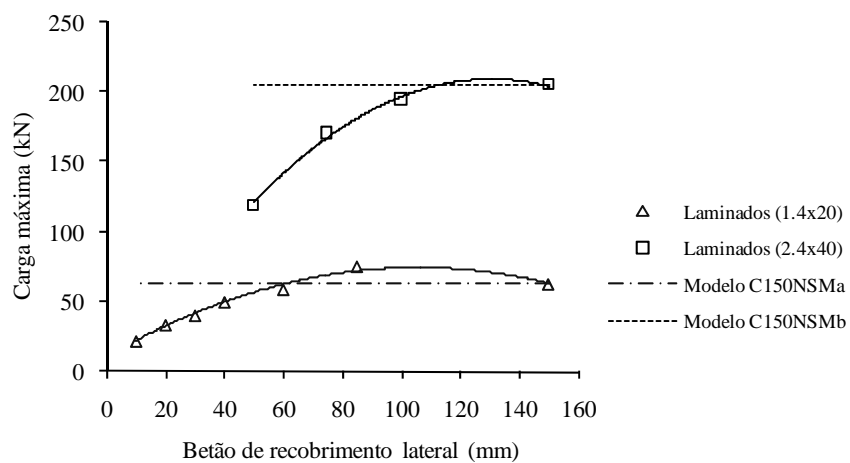


Figura 2.23 - Efeito da espessura do betão de recobrimento lateral (adaptado de Rashid *et al.*, 2008).

O estudo experimental realizado por Rashid *et al.* (2008) permitiu concluir que, para o caso do reforço com laminados de CFRP colados externamente, não há qualquer tipo de interacção entre CFRP adjacentes (a cedência dos laminados ocorre separadamente), enquanto para o caso dos laminados inseridos existe uma interacção entre laminados vizinhos para espaçamentos inferiores a um determinado valor (53mm). Ainda no que diz respeito ao comportamento da ligação com laminados de CFRP, os autores também concluíram existir perca de eficácia na mobilização do laminado quando a espessura do betão de recobrimento lateral é inferior a três vezes e meia a altura do laminado (h_f - ver Figura 2.20).

Nesta secção deu-se particular relevo a aspectos relacionados com o comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP quando este é aplicado usando a técnica NSM com laminados. Algumas das considerações que se acabam de fazer sobre este assunto serão novamente objecto de análise nos capítulos seguintes desta dissertação.

2.3 - REFORÇO AO CORTE DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM CFRP

2.3.1 - Considerações gerais

Uma intervenção de reforço ao esforço transversal de um determinado elemento estrutural de betão armado pode ser devida a qualquer das causas enunciadas no primeiro parágrafo da secção 2.1 deste capítulo. Além disso, refira-se também os casos de elementos estruturais que, posteriormente a uma intervenção de reforço à flexão, o seu modo de rotura passa a ser por corte. Esta ocorrência deve ser evitada dado que a rotura por corte é frágil e quase instantânea (sem aviso). Assim, um reforço à flexão pode também, requerer um reforço ao esforço transversal, de forma a que uma rotura do tipo frágil não ocorra.

Tradicionalmente, existem duas técnicas de reforço ao corte de vigas de betão armado, uma que recorre à utilização de armaduras exteriores, e uma outra em que as secções são encamisadas em betão armado. A utilização de armaduras exteriores (chapas de aço ou perfis metálicos) é uma técnica adequada quando há deficiência de armaduras transversais (Figura 2.24). A fixação destes elementos é geralmente efectuada com adesivos epoxi, os quais podem ser aplicados por espalhamento sobre as superfícies a fixar ou por injeção, preenchendo os espaços entre a superfície da peça a reforçar e o elemento de reforço. A ligação pode ser complementada com buchas metálicas. De forma a garantir boas condições de ligação do reforço é necessário proceder a uma cuidadosa preparação, não somente da superfície de betão a reforçar, como também das chapas. Trata-se de uma técnica simples de

executar e que recorre a materiais com comportamento bem conhecido. No entanto, apresenta alguns inconvenientes, que foram referidos na secção 2.1 deste capítulo.

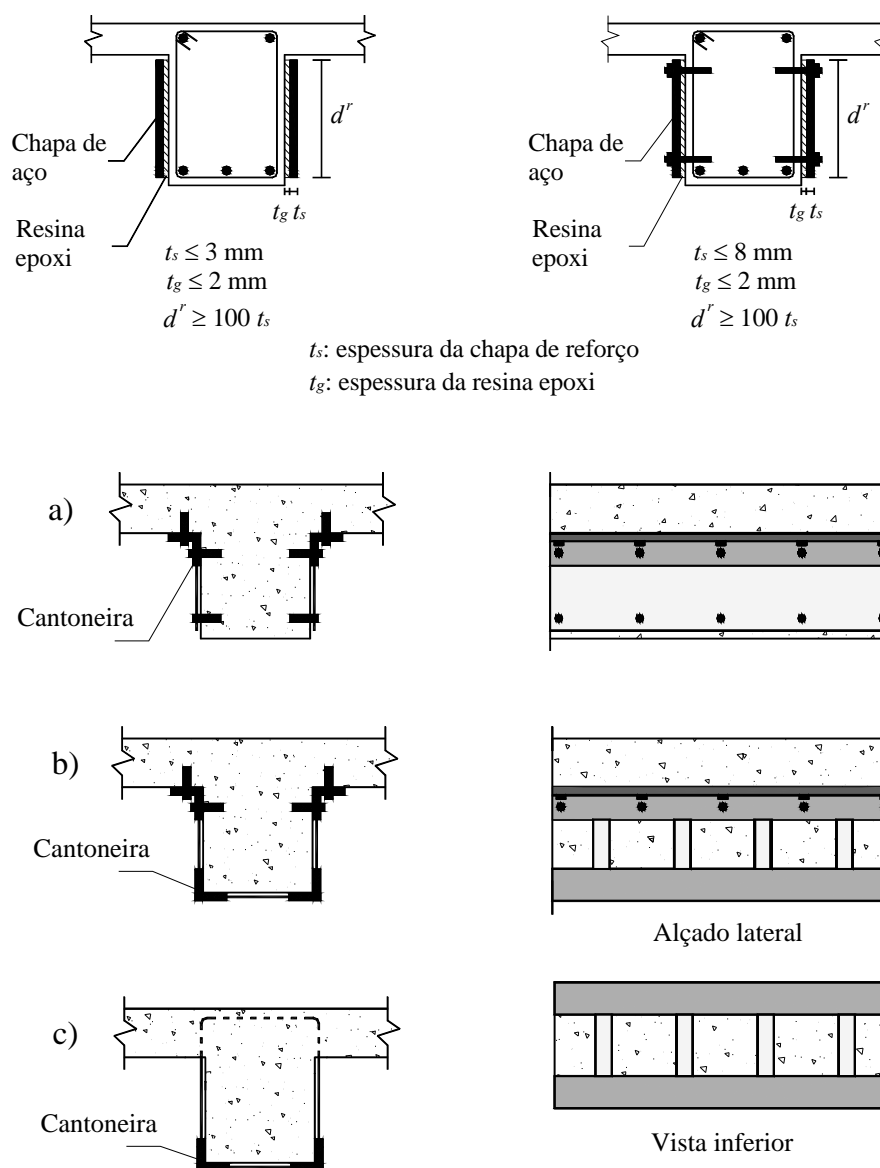


Figura 2.24 - Reforço ao corte por aplicação de armaduras exteriores (Appleton e Gomes, 1997).

A técnica de encamisamento com betão armado consiste no aumento da secção transversal introduzindo-se uma armadura suplementar numa camada de betão que envolve a secção inicial (Figura 2.25). Face à técnica baseada na aplicação de armaduras exteriores, esta técnica garante maior protecção ao fogo e à corrosão das armaduras suplementares. No entanto, apresenta os inconvenientes referidos na secção 2.1 deste capítulo.

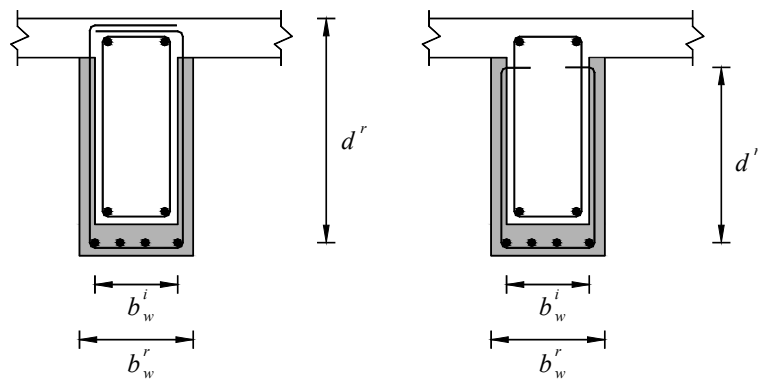
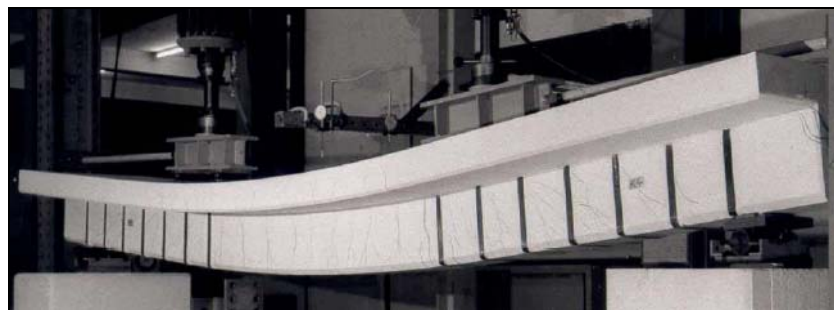


Figura 2.25 - Reforço ao corte por encamisamento das secções (Gomes e Appleton, 1997).



a) Colagem externa de mantas de CFRP (Khalifa, 1999)



b) Colagem externa de laminados de CFRP em forma de L (EMPA, 1998 e Basler *et al.*, 2003)



c) Inserção de varões de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento (De Lorenzis e Nanni, 2001)

Figura 2.26 - Reforço ao corte com compósitos de CFRP.

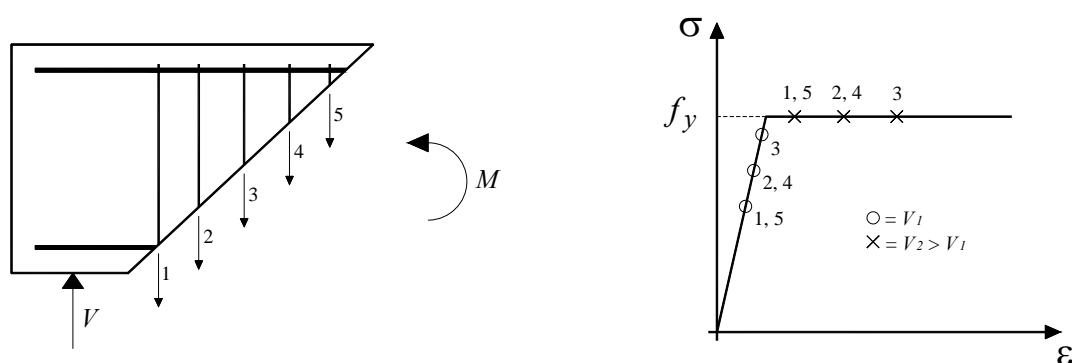
Tal como foi referido na secção 2.1 deste capítulo, o reforço com materiais compósitos de CFRP é uma alternativa às técnicas de reforço tradicionais. Na Figura 2.26 apresentam-se alguns detalhes das técnicas de reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP desenvolvidas até ao momento, nomeadamente, a técnica que recorre à colagem externa de compósitos de CFRP (mantas - Figura 2.26a e laminados - Figura 2.26b) e a técnica que se baseia na inserção de varões de CFRP em entalhes realizados no betão de recobrimento (Figura 2.26c).

O reforço à flexão e o confinamento de pilares com compósitos de CFRP apresentam, actualmente, um estado de conhecimento/desenvolvimento bastante grande, o que não acontece relativamente ao reforço ao corte com CFRP. Para tal, contribui o facto do comportamento de elementos de betão armado com rotura por corte ser, por si só, um fenómeno de análise complexa, devido aos vários parâmetros que influenciam o referido comportamento: geometria do elemento, tipo de carregamento, relação entre o vão de corte e altura útil da viga (relação a/d), percentagem de estribos existentes, percentagem da armadura longitudinal existente, e resistência do betão. Em elementos reforçados ao corte com CFRP outros modos de rotura podem ser observados e novos aspectos associados ao CFRP aumentam a complexidade do problema do corte em vigas de betão armado (Bousselham e Chaallal, 2004). Para este cenário contribuem os seguintes factos:

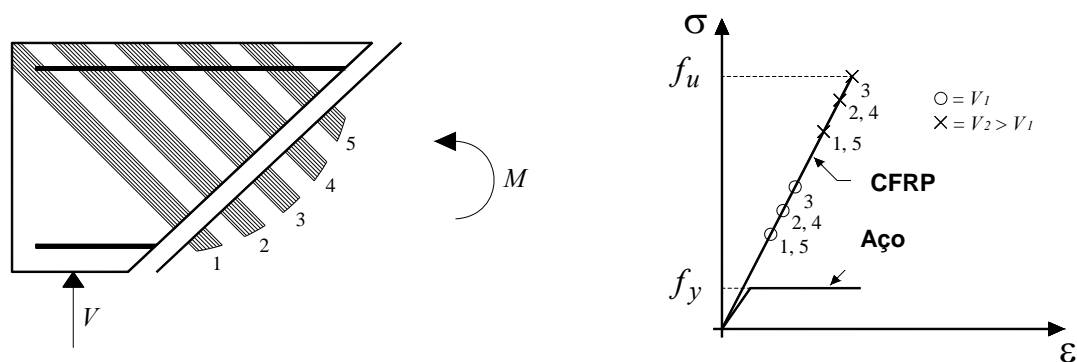
- enquanto os estribos fazem parte de uma estrutura monolítica, os CFRP são colados, ou seja, é introduzida uma nova variável que está associada à questão da resistência da ligação colada betão/CFRP (aderência na interface betão/CFRP). Esta depende de vários parâmetros, tais como: classe do betão, características do material de colagem do CFRP ao betão, tipo e percentagem de CFRP.
- os materiais compósitos de CFRP têm um comportamento linear à tracção até à sua rotura violenta, o que não acontece com o aço das armaduras que tem um comportamento elasto-plástico. Na Figura 2.27 está representada a diferença de comportamento referida, onde, a título qualitativo, as tensões instaladas nos cinco estribos e nos cinco CFRP atravessados pela fenda de rotura de corte são representadas. O facto do estribo 3 e do CFRP 3 estarem sujeitos a valores mais elevados de tensões deve-se à forma como a fenda de corte surge (aparece aproximadamente a meia altura da secção transversal).
- o princípio básico do reforço ao corte com CFRP suporta-se na colocação deste com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte (Khalifa, 1999). Para tal, como já se referiu anteriormente, existem vários tipos de produtos de CFRP e várias configurações de reforço (Figura 2.28) em termos de superfície colada (reforço envolvendo toda a secção, em forma de U ou apenas colado nas faces laterais das vigas), distribuição do CFRP (contínua ou discreta), orientação das fibras (90°, 60°, 45°, etc), sobreposição

de camadas com orientações diferentes ($0/90^\circ$, $\pm 45^\circ$, etc) e adopção de mecanismos exteriores de fixação;

- o facto dos CFRP serem aplicados em vigas com determinada percentagem de estribos de aço pressupõe que a interacção entre os elementos resistentes ao esforço transversal (estribos + CFRP) seja um aspecto que determina a eficácia das técnicas de reforço com CFRP. Na Figura 2.29 apresenta-se, qualitativamente, a diferença de comportamento de duas vigas reforçadas com CFRP, uma com e outra sem estribos de aço. Da análise desta figura é possível constatar que quando a viga dispõe de estribos de aço ocorre um padrão de fendilhação bastante mais difuso do que o registado numa viga sem estribos. Este facto indicia que em vigas com rotura por corte, contendo uma determinada percentagem de armadura transversal, e reforçadas ao esforço transversal com compósitos de CFRP, se verifique uma diminuição no rendimento do CFRP, quando este é comparado com o que é obtido em vigas com o mesmo cenário de reforço, mas sem armaduras transversais. Esta constatação tem como base o facto de ao padrão de fendilhação mais difuso verificado nas vigas com alguma percentagem de estribos, estarem associadas condições de ancoragem dos CFRP mais precárias do que as verificadas em vigas sem armaduras transversais.
- existe mais do que uma técnica de aplicação do reforço de CFRP.

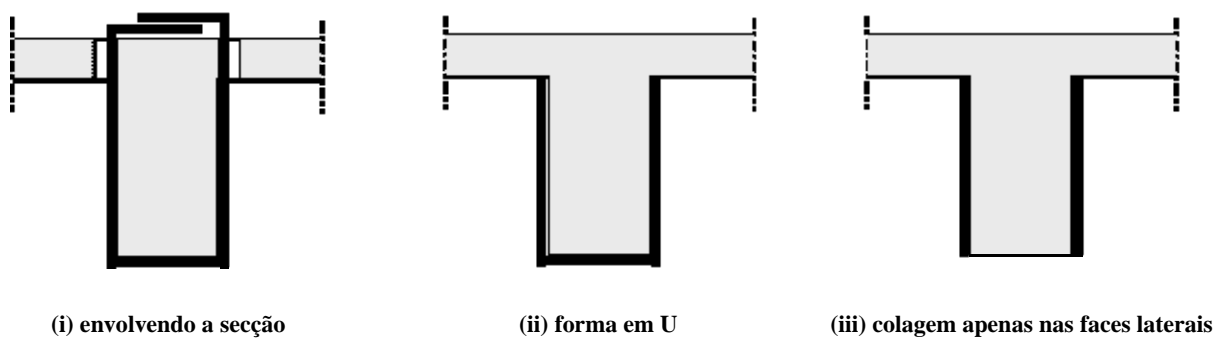


a) Princípio de funcionamento dos estribos de aço

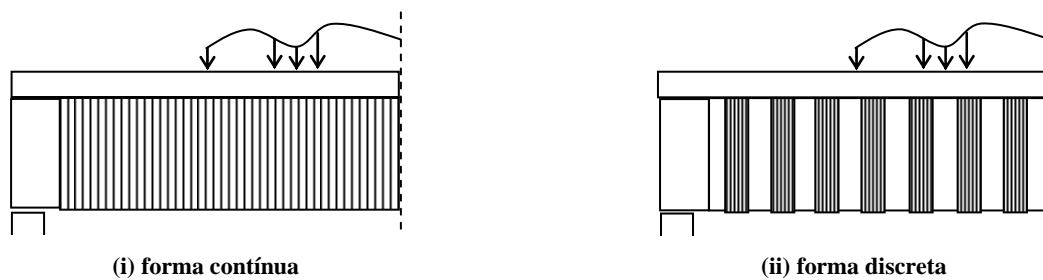


b) Princípio de funcionamento do reforço com CFRP

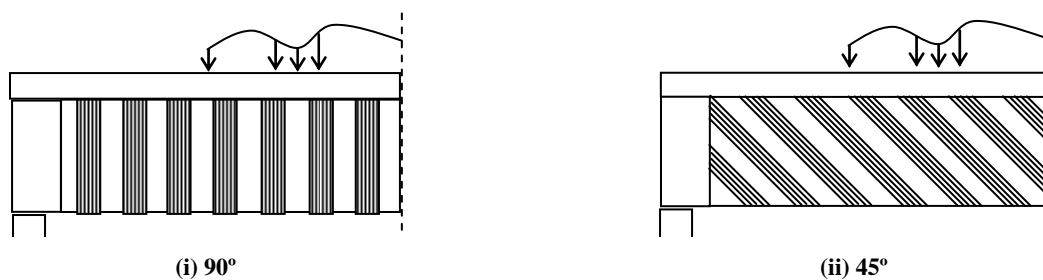
Figura 2.27 - Princípio de funcionamento dos estribos de aço e dos compósitos de CFRP (Carolin, 2003).



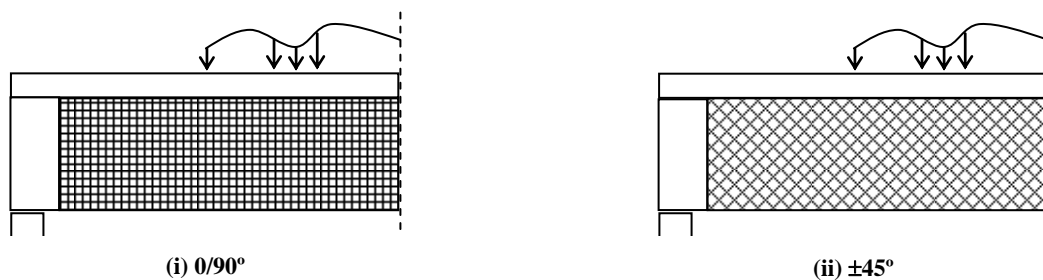
a) Configurações da superfície colada



b) Distribuição do reforço de CFRP



c) Orientação das fibras



d) Sobreposição de camadas com orientação diferente das fibras



e) Mecanismos de ancoragem

Figura 2.28 - Configurações possíveis para o reforço ao corte com compósitos de CFRP (Khalifa, 1999).

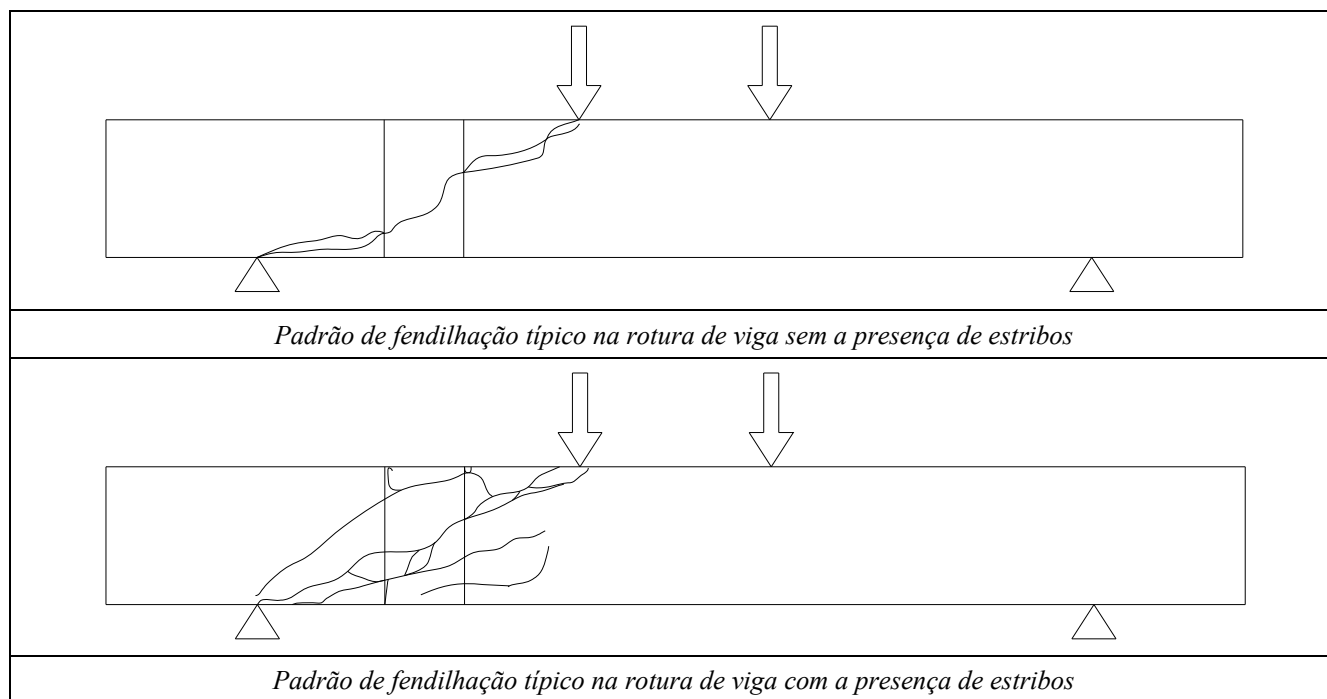


Figura 2.29 - Efeito da presença de estribos de aço no padrão de fendilhação de uma viga com rotura por corte (Pellegrino e Modena, 2002).

2.3.2 - Aplicação da técnica da colagem externa

Até ao momento, a maior parte dos estudos experimentais realizados sobre o reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP centraram-se na técnica da colagem externa. De seguida, serão apresentados alguns trabalhos experimentais realizados de forma a ilustrar o desempenho desta técnica de reforço, os modos de rotura observados e a influência de alguns parâmetros na eficácia da técnica EBR. Posteriormente, esta análise será expandida para uma base de dados que foi criada considerando um significativo número de modelos ensaiados até ao presente.

Khalifa (1999), com o objectivo de avaliar o desempenho da técnica de reforço ao corte com mantas de CFRP coladas externamente, ensaiou à flexão, sob quatro pontos de carga, seis vigas T de betão armado. Os parâmetros avaliados, conforme se pode verificar da análise da Figura 2.30, foram a quantidade e distribuição do CFRP (reforço contínuo vs reforço discreto), a forma do reforço (em forma de U vs colagem nas faces laterais da viga), a orientação das fibras (90° vs combinação $90^\circ/0^\circ$) e o desempenho de um sistema de ancoragem do reforço de CFRP (ver Figura 2.31). As vigas estavam armadas na face traccionada com dois varões longitudinais de 28 mm de diâmetro e não continham armaduras transversais entre apoios. A relação entre o comprimento do vão de corte (a) e a altura útil da secção (d), a/d , era de três.

	<p>Dimensões em mm</p>
Viga C-BT1 (Viga de referência sem reforço): dimensões em mm	Secção transversal das vigas
Viga C-BT2 (Uma camada contínua de manta de CFRP em forma de U com as fibras orientadas a 90°)	
Viga C-BT3 (Duas camadas contínuas de manta de CFRP: uma em forma de U com as fibras orientadas a 90° e outra nas faces laterais da viga com as fibras orientadas a 0°)	
Viga C-BT4 (Faixas de manta de CFRP em forma de U com as fibras orientadas a 90°, com 50 mm de largura e espaçadas de 125 mm)	
Viga C-BT5 (Faixas de manta de CFRP coladas nas faces laterais da viga com as fibras orientadas a 90°, com 50 mm de largura e espaçadas de 125 mm)	
Viga C-BT6 (Uma camada contínua de manta de CFRP em forma de U com as fibras orientadas a 90° tendo-se considerado um sistema de ancoragem do reforço - ver Figura 2.31)	

Figura 2.30 - Vigas T reforçadas ao corte por colagem externa de mantas de CFRP (Khalifa, 1999).



Figura 2.31 - Ancoragem do reforço de CFRP de manta contínua em forma de U.

Na Figura 2.32 apresentam-se as curvas de comportamento correspondentes à relação entre a carga aplicada e o deslocamento central das vigas C-BT1, C-BT2, C-BT3, C-BT4, C-BT5 e C-BT6 (ver Figura 2.30). Para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores registados para a carga máxima, o ganho de resistência proporcionado pelo reforço e o modo de rotura verificado são apresentados na Tabela 2.8. Os resultados obtidos neste programa de ensaios permitiram avançar com as seguintes conclusões:

- os reforços utilizados garantiram um aumento da capacidade de carga das vigas de 35% a pelo menos 145% (a viga a que se refere este valor teve como modo de rotura a cedência das armaduras longitudinais, não tendo sido mobilizada a totalidade da contribuição do reforço de CFRP);
- comparando os resultados das vigas C-BT2 e C-BT3 verifica-se que a aplicação, nas faces laterais do elemento, de uma camada de manta de CFRP com as fibras orientadas a 0° não provocou um ganho significativo na capacidade portante da viga C-BT3;
- comparando os resultados das vigas C-BT4 e C-BT5 verifica-se que o reforço colocado em forma de U foi bastante mais eficiente do que a colagem nas faces laterais da viga;
- comparando os resultados da viga C-BT2 e C-BT4 verifica-se que a colagem do reforço de CFRP em U de forma discreta foi mais eficiente do que a colagem em forma contínua;
- a ancoragem do reforço de CFRP (viga C-BT6) garantiu que este tivesse mais do dobro da eficiência do que o mesmo reforço sem ancoragem (viga C-BT2), permitindo também que o modo de rotura não fosse por corte (modo de rotura frágil), mas sim por cedência das armaduras longitudinais de tracção (modo de rotura dúctil). Com a excepção da viga C-BT6, o modo de rotura verificado nas vigas com CFRP foi por destacamento do CFRP (Figura 2.46).

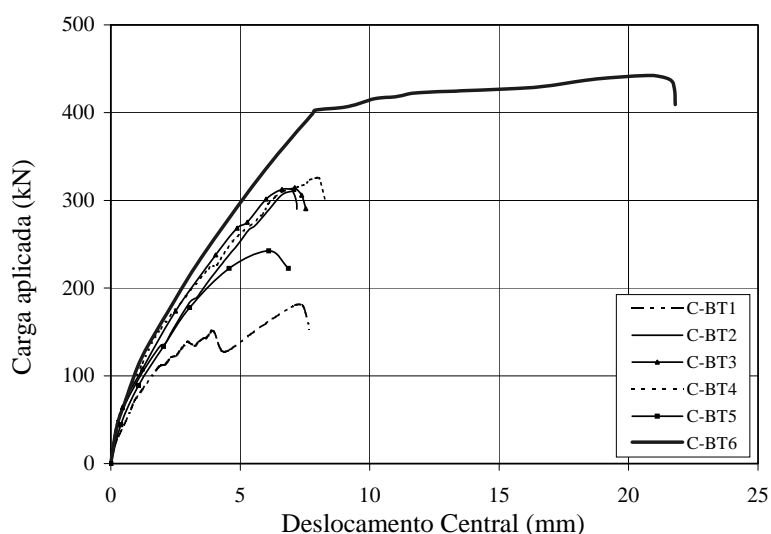


Figura 2.32 - Curvas carga aplicada vs deslocamento central das vigas (Khalifa, 1999).

Tabela 2.8 - Resultados dos ensaios realizados por Khalifa (1999).

Vigas	Reforço ao corte	Carga Máxima [kN]	Ganho de Resistência [%]	Modo de Rotura
C-BT1	-	180	-	Corte
C-BT2	Uma camada contínua de manta de CFRP em forma de U	310	72	Destacamento do CFRP
C-BT3	Duas camadas (90°/0°)	315	75	Destacamento do CFRP
C-BT4	Faixas de manta em U de 50 mm @125mm	325	80	Destacamento do CFRP
C-BT5	Faixas de manta verticais de 50 mm @125mm	243	35	Destacamento do CFRP
C-BT6	Uma camada contínua de manta de CFRP em forma de U com sistema de ancoragem do reforço	442	>145	Flexão

Khalifa e Nanni (2002) efectuaram um programa de ensaios experimentais com vigas de betão armado de secção rectangular ($150 \times 305 \text{ mm}^2$) para avaliar o desempenho de diferentes cenários de reforço ao corte com mantas de CFRP coladas externamente, conforme representado na Figura 2.33. Concretamente, foram ensaiadas vigas com as seguintes disposições do reforço de CFRP: i) faixas de uma camada de manta, com 50 mm de largura e espaçadas de 125 mm, em forma de U com as fibras orientadas a 90° (vigas SO3-2 e SO4-2); ii) faixas de uma camada de manta, com 75 mm de largura e espaçadas de 125 mm, em forma de U com as fibras orientadas a 90° (vigas SO3-3); iii) uma camada contínua de manta em forma de U com as fibras orientadas a 90° (vigas SO3-4 e SO4-3); iv) duas camadas contínuas de manta, uma em forma de U com as fibras orientadas a 90° e outra colada apenas nas faces laterais da viga com as fibras orientadas a 0° (SW3-2, SW4-2 e SO3-5).

O reforço foi efectuado em vigas sem estribos e vigas com uma determinada percentagem de estribos. Além da quantidade e forma de reforço de CFRP, da presença ou não de estribos de aço, a relação entre o comprimento do vão de corte (a) e a altura útil da secção (d) foi também um dos parâmetros analisados, tendo sido ensaiadas vigas com $a/d = 3$ e $a/d = 4$. Foram também ensaiadas quatro vigas de referência, tal como se encontra registado na Tabela 2.9. Todas as vigas foram dimensionadas de forma a que a rotura fosse por corte. As vigas foram ensaiadas à flexão sob quatro pontos de carga até à sua rotura. A percentagem de estribos num dos vãos de corte foi dimensionada para que a rotura ocorresse sempre no outro vão de corte. Na Figura 2.33 e na Tabela 2.9 apresentam-se os dados das vigas ensaiadas. Na referida tabela também se registam os principais resultados obtidos nos ensaios (máxima extensão medida no CFRP e carga máxima registada em cada modelo de viga) e o ganho de resistência conferido pelo reforço de CFRP.

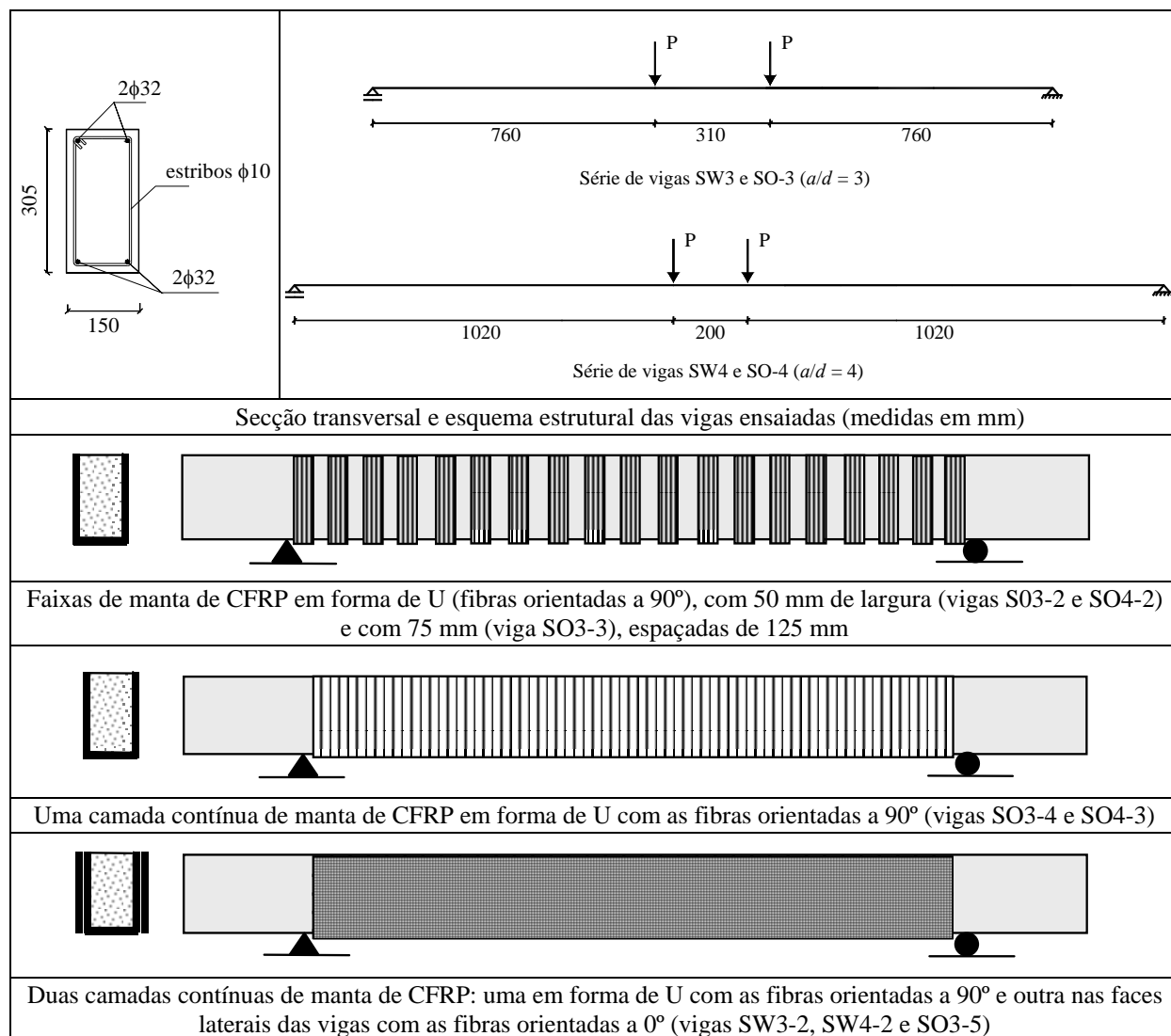


Figura 2.33 - Vigas ensaiadas por Khalifa e Nanni (2002).

Tabela 2.9 - Modelos ensaiados por Khalifa e Nanni (2002).

Vigas	a/d	Reforço ao corte		Máxima extensão lida no CFRP [%] *	Carga Máxima [kN]	Ganho de Resistência [%]
		Estribos de aço	Mantas de CFRP			
SW3-1	3	$\phi 10@125\text{mm}$	-	-	253	-
SW3-2			2 camadas contínuas de manta (90°/0°)	0.23	354	40
SW4-1			-	-	200	-
SW4-2	4		2 camadas contínuas de manta (90°/0°)	0.19	361	80
SO3-1	3	-	-	-	154	-
SO3-2			Faixas de manta de 50 mm @125mm	0.47	262	70
SO3-3			Faixas de manta de 75 mm @125mm	0.52	266	73
SO3-4			1 camada de manta continua (90°)	0.45	289	88
SO3-5			2 camadas contínuas de manta (90°/0°)	0.43	339	120
SO4-1	4	-	-	-	130	-
SO4-2			Faixas de manta de 50 mm @125mm	0.62	255	96
SO4-3			1 camada de manta continua (90°)	0.43	310	138

* O valor da extensão última correspondente à manta de CFRP utilizada no reforço das vigas era de 1.66%.

Os resultados obtidos confirmam que a técnica da colagem externa de mantas de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado pode ser utilizada para aumentar significativamente a capacidade de carga de elementos susceptíveis de terem rotura por corte. Nos modelos ensaiados houve aumentos da capacidade resistente de 40% a 138%. Constatou-se que a contribuição do reforço externo com CFRP para a capacidade resistente ao corte é influenciada pela relação (a/d). De facto, o desempenho do reforço foi maior em vigas com $a/d = 4$ do que em vigas com $a/d = 3$. Também se verificou que o aumento na resistência ao corte não é directamente proporcional com o aumento da quantidade de reforço. Por exemplo, a viga SO3-4 tem uma quantidade de reforço superior a duas vezes e meia à que foi colocada na viga SO3-2. No entanto, verificou-se que relativamente a esta última, a viga SO3-4 apenas obteve um acréscimo de 10% no valor da capacidade de carga resistente. Também se constatou que a presença de uma camada contínua de manta nas faces laterais da viga (fibras orientadas a 0°) aumenta a capacidade resistente da viga. Os resultados dos ensaios de Khalifa e Nanni (2002) indicam que o benefício do reforço ao corte por colagem externa de mantas é superior no caso das vigas sem presença de estribos. Este facto também foi constatado por vários autores (Pelllegrino e Modena (2002); Bousselham e Chaallal (2006-a)).

Os laminados unidireccionais de fibras de carbono são outra opção dos CFRP no reforço ao corte de elementos de betão. Devido ao seu processo de fabrico, os laminados têm características bem definidas apresentando assim pouca variabilidade nas suas propriedades mecânicas. Refira-se que o mesmo pode não acontecer para o caso das mantas, pois o facto da sua impregnação se efectuar “in situ”, segundo um processo manufacturado, pode originar problemas tais como: não alinhamento das fibras na direcção pretendida; distribuição não uniforme de resina (proporcionando zonas com excesso ou deficiência de impregnação das fibras); existência de bolhas de ar.

Chaallal *et al.* (1998) ensaiaram vigas de betão armado com o objectivo de avaliar a eficácia da utilização de laminados de CFRP no reforço ao corte, sendo estes colados externamente nas faces laterais das vigas. Estes autores ensaiaram quatro grupos de vigas (duas vigas por grupo). As vigas do primeiro grupo foram dimensionadas de forma a ser evitada a rotura por corte, dispondo de estribos de 6 mm de diâmetro afastados de 50 mm. As vigas do segundo grupo tinham estribos de 6 mm afastados de 200 mm. As vigas dos restantes dois grupos eram semelhantes às vigas do grupo anterior, mas foram reforçadas ao corte com laminados de CFRP colados externamente nas faces laterais das vigas. Concretamente, no terceiro grupo de vigas foram colados laminados na direcção perpendicular ao eixo da viga (laminados verticais) com 50 mm de largura, 1 mm de espessura e espaçados de 100 mm, enquanto no quarto grupo de vigas, laminados do mesmo tipo foram colados com uma inclinação de 45° e afastados entre si de 150 mm. Assim, as orientações adoptadas para as fibras foram semelhantes às representadas na Figura 2.28-c(i) (grupo 3) e na Figura 2.28-c(ii)

(grupo 4). Refira-se que o critério de reforço adoptado teve como objectivo que as vigas dos grupos 3 e 4 tivessem capacidade máxima resistente igual à das vigas do grupo 1.

Na Tabela 2.10 registam-se os valores médios da carga máxima e respectivo deslocamento central para os quatro grupos de vigas ensaiadas. Quando comparadas com as vigas do grupo 2 (vigas com uma pequena percentagem de armadura transversal) constata-se que a quantidade de estribos das vigas do grupo 1 permitiu um aumento de 105% na carga máxima das vigas, enquanto os CFRP garantiram incrementos de 71% e 82%, sendo o maior valor o registado nas vigas com laminados inclinados (grupo 4). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com CFRP com a obtida nas vigas do grupo 1, verifica-se que nas vigas dos grupos 3 e 4 alcançou-se um valor 16% e 11% inferior, respectivamente. Também se constatou que, quando comparado com o deslocamento de pico (deslocamento a meio vão correspondente à carga máxima) verificado nas vigas do grupo 2, o deslocamento de pico registado nas vigas do grupo 1 foi 237% superior, enquanto nas vigas reforçadas com laminados verticais e inclinados foi 9% e 43% superior, respectivamente. Os autores deste estudo concluíram que: i) a colagem externa de laminados de CFRP aumenta quer a rigidez da resposta deformacional, quer a capacidade de carga última; ii) os laminados dispostos com uma inclinação a 45° conduziram a melhores resultados que os laminados verticais em termos do controlo da fendilhação, de rigidez e capacidade de carga última; iii) o destacamento do reforço foi o modo de rotura típico das vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP colados externamente.

Tabela 2.10 - Resultados dos modelos ensaiados por Chaallal *et al.* (1998).

Vigas	Reforço ao corte	Capacidade resistente máxima	
		Carga Máxima [kN]	Deslocamento Central [mm]
Grupo 1	φ6@50mm	218.0	11.8
Grupo 2	φ6@200mm	106.5	3.5
Grupo 3	φ6@200mm + CFRP-verticais@100mm	182.5	3.8
Grupo 4	φ6@200mm + CFRP-inclinados45@150mm	193.5	5.0

Uma outra alternativa de reforço ao corte de vigas de betão armado diz respeito à utilização de laminados de CFRP em forma de L (ver Figura 2.34). Com o objectivo de melhorar a aderência do reforço à superfície de betão, os laminados pré-fabricados de CFRP em forma de L têm uma zona de extremidade rugosa. Ensaio realizados em vários programas experimentais no Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA, 1998, EMPA, 2002 e Basler *et al.*, 2003) com vigas de betão armado, de secção em T, reforçadas ao corte com laminados de CFRP pré-fabricados em forma de L permitiram retirar as seguintes conclusões: i) utilizando o sistema Sika

CarboShear L o modo de rotura frágil, por corte da viga, pode ser convertido em modo de rotura dúctil, por flexão, com cedência das armaduras longitudinais (Figura 2.35); ii) o reforço proporciona aumentos da capacidade de carga da estrutura; iii) o reforço com CFRP-L pode ser usado para melhorar o comportamento em serviço, dado que permite diminuir a deformação da viga, as extensões nos estribos e a abertura de fenda; iv) pode ocorrer o modo de ruína por destacamento do sistema de reforço (Figura 2.36).



Figura 2.34 - Laminados pré-fabricados em forma de L (Sika® CarboShear L®, 2003).

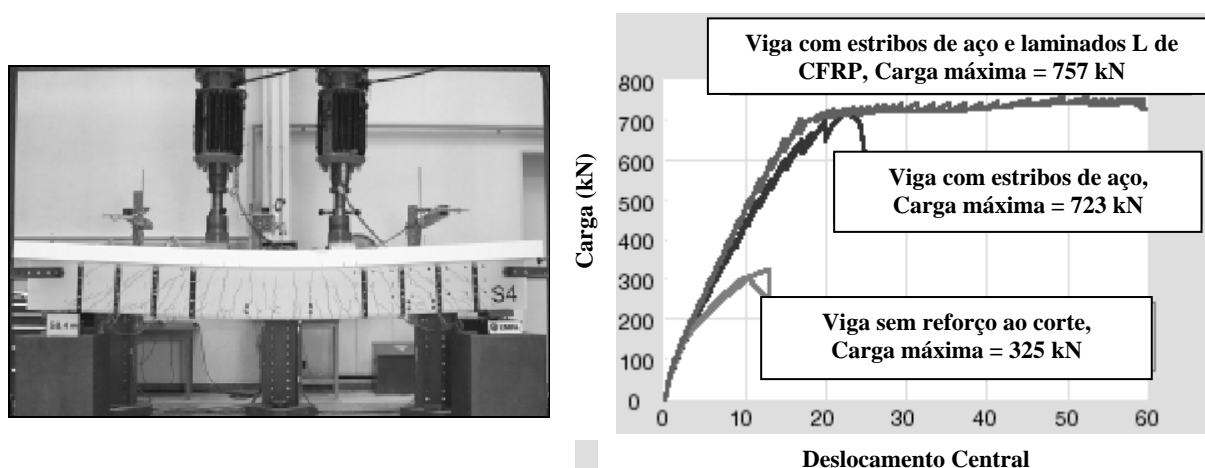


Figura 2.35 - Ensaios realizados no EMPA (2002).



Figura 2.36 - Modo de rotura por destacamento do reforço de CFRP (EMPA, 1998 e Basler *et al.*, 2003).

Os estudos experimentais apresentados anteriormente sobre o reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP, aplicados usando a técnica da colagem externa, representam uma pequena parcela da investigação realizada até ao momento sobre este tema. A sua apresentação neste

trabalho teve como objectivo mostrar com mais detalhe alguma da investigação realizada na área do conhecimento em análise, de formar a ser criada uma maior sensibilidade ao fenómeno em estudo. De seguida será apresentada, de uma forma resumida, a compilação de um significativo conjunto de resultados experimentais disponíveis actualmente, através da qual se fará uma análise sobre a influência de alguns dos parâmetros mais significativos na eficácia da técnica EBR com compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado.

Bousselham e Chaallal (2004), aumentando a base de dados criada por Triantafillou e Antonopoulos (2000), efectuaram uma compilação dos resultados de vários trabalhos experimentais que são normalmente referenciados na maioria dos trabalhos científicos desenvolvidos nesta área. De forma a aumentar a referida base de dados, e no âmbito da investigação relativa à presente dissertação, foram adicionados novos resultados experimentais aos apresentados pelos referidos autores. Na Tabela 2.11 estão registados os dados gerais dos trabalhos de investigação que fazem parte da base de dados que será mais à frente objecto de análise. Refira-se que, do trabalho de Bousselham e Chaallal (2004), apenas foram considerados os modelos que continham CFRP (fibras de carbono). Na Tabela 2.12, para cada modelo de viga analisado, apresentam-se as principais propriedades que o caracterizam assim como os parâmetros avaliados com base nos resultados experimentais obtidos.

Na Tabela 2.12 o valor do ganho de resistência ao corte proporcionado pelo reforço de CFRP foi definido por:

$$\text{Ganho de resistência ao corte} = (V_f / (V_{total} - V_f)) \times 100, \quad (2.1)$$

a partir do qual se avaliou o valor da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) usando a analogia da treliça, ou seja, ε_{fe} foi definida por:

$$\varepsilon_{fe} = V_f / (0.9 b_w d E_f \rho_f (\sin \theta_f + \cos \theta_f)) \quad (2.2)$$

Em (2.1) V_f e V_{total} são, respectivamente, o valor do esforço transversal resistente conferido pelo CFRP e o valor total do esforço transversal resistente da viga reforçada. Em (2.2) b_w e d são a largura e a altura útil da secção transversal, respectivamente, e o parâmetro θ_f é o ângulo que as fibras do CFRP fazem com o eixo longitudinal dos elementos reforçados. Ainda na expressão (2.2), E_f e ρ_f são, respectivamente, o módulo de elasticidade do CFRP e a taxa de reforço ao corte de CFRP. Esta, no caso do reforço de CFRP aplicado de forma discreta (Figura 2.28.b-ii), foi definida por:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f}{b_w \cdot s_f} \quad (2.3)$$

enquanto no caso do reforço de CFRP aplicado de forma contínua (Figura 2.28.b-i) foi definida por:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f}{b_w} \quad (2.4)$$

Na expressão (2.3) w_f e s_f são, respectivamente, a largura e o espaçamento das faixas de CFRP (Figura 2.37). Nas expressões (2.3) e (2.4) n e t_f são, respectivamente, o número de camadas e a espessura das faixas de CFRP (Figura 2.37).

Na Tabela 2.12 apresentam-se, para os vários modelos em análise, a percentagem de armadura transversal, ρ_{sw} (caso exista) e a percentagem de armadura longitudinal, ρ_{sl} . A percentagem de armadura transversal (estribos verticais), ρ_{sw} , foi quantificada por:

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s_w} \times 100 \quad (2.5)$$

em que A_{sw} é a área resistente ao corte de cada um dos estribos de aço colocados na viga com um espaçamento s_w . A percentagem de armadura longitudinal, ρ_{sl} , foi definida usando:

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \times 100 \quad (2.6)$$

em que A_{sl} é a área da secção transversal dos varões de aço colocados longitudinalmente. Na Figura 2.37 ilustram-se algumas das grandezas referidas e presentes nas expressões (2.2) a (2.6).

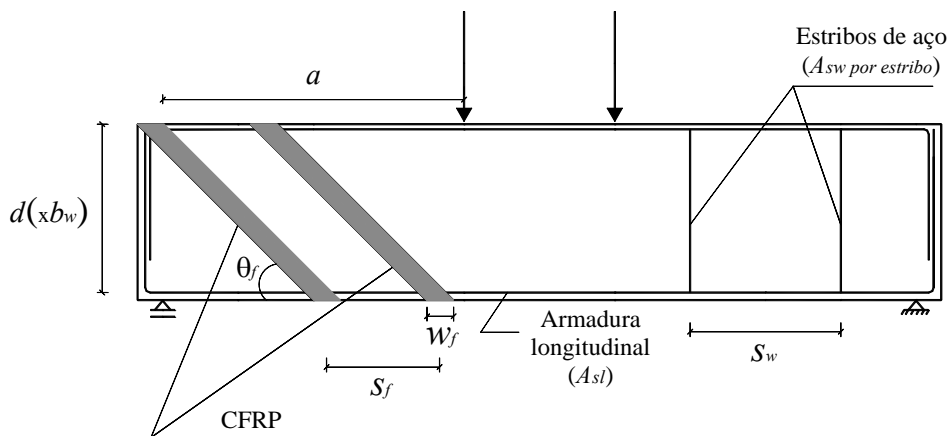


Figura 2.37 - Definição de alguns dos parâmetros presentes nas expressões de (2.2) a (2.6).

Tabela 2.11 - Informações gerais sobre os trabalhos de investigação considerados para a constituição da base de dados de resultados experimentais sobre o reforço ao corte com CFRP (técnica da colagem externa).

[illegible]

Tabela 2.12 - Resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte por intermédio da colagem externa de CFRP (cont.).

Modelo	b_w [m]	d [m]	Secção	f_c [MPa]	Configuração	ρ_f [%]	E_f [GPa]	ε_{fu} [%]	θ_f [°]	ρ_{sw} [%]	ρ_{sl} [%]	E_s [GPa]	a/d	Modo de rotura	V_f [kN]	V_{total} [kN]
U(3)	0.1	0.17	Rec.	24.6	Ct-W	1.94	230	11.5	90	0	2.36	200	2.5	CFRP-R	34.5	59.5
U(5)	0.1	0.17	Rec.	24.6	Ct-S	1.94	230	11.5	90	0	2.36	200	2.5	CFRP-D	20.5	45.5
U(6)	0.1	0.17	Rec.	27.4	Ct-S	1.94	230	11.5	45	0	2.36	200	2.5	CFRP-D	33	58
U(7)	0.1	0.17	Rec.	27.4	Ct-S	3.9	230	11.5	90	0	2.36	200	2.5	CFRP-D	20.5	45.5
SU(S2)	0.2	0.26	Rec.	45.2	St-S	0.6	230	15.1	90	0	3.3	180	2.7	CFRP-D	68.4	160.5
SU(S3)	0.2	0.26	Rec.	41.3	St-U	0.6	230	15.1	90	0	3.3	180	2.7	CFRP-D	110	202.1
SU(S4)	0.2	0.26	Rec.	37.5	Ct-S	1.2	230	15.1	90	0	3.3	180	2.7	CFRP-D	64.2	156.3
SU(S5)	0.2	0.26	Rec.	39.7	Ct-U	1.2	230	15.1	90	0	3.3	180	2.7	CFRP-D	106.1	198.2
MI(AN-1/5 Z-3)	0.125	0.165	Rec.	35.1	St-W	0.35	230	15.1	90	0	4.76	200	3	CFRP-R	18.75	75.2
MI(AN-1/2 Z-3)	0.125	0.165	Rec.	32.4	St-W	0.88	230	15.1	90	0	4.76	200	3	CFRP-R	29.5	86
MI(CN-1/L Z-2)	0.125	0.165	Rec.	39.1	St-W	0.88	230	15.1	90	0	2.75	200	2	CFRP-R	34.55	93.1
TK(BS2)	0.2	0.42	Rec.	35.1	St-U	0.28	280	12.5	90	0.14	2.24	200	3	CFRP-D	41.2	247.5
TK(BS5)	0.2	0.42	Rec.	36.8	Ct-U	0.14	280	12.5	90	0.07	2.24	200	3	CFRP-D	33.4	170
TK(BS6)	0.2	0.42	Rec.	35.8	St-U	0.14	280	12.5	90	0.07	2.24	200	3	CFRP-D	30.1	166.7
TK(BS7)	0.2	0.42	Rec.	34.7	St-W	0.28	280	12.5	90	0.07	2.24	200	3	Sem rotura*	98.9	235.5
SUK(2)	0.15	0.24	T-	35.7	Ct-U	1.48	230	15.1	90	0.42	5.63	183	2.5	CFRP-D	24	223
SUK(3)	0.15	0.24	T-	35.3	Ct-U	1.48	230	15.1	90	0.42	5.63	183	2.5	CFRP-D	65	264
UF(CS1)	0.3	0.257	Rec.	40.5	Ct-W	0.74	244	17.5	90	0.48	1.09	191	3	Sem rotura*	87	214
UF(CS2)	0.3	0.257	Rec.	40.5	St-W	0.37	244	17.5	90	0.48	1.09	191	3	CFRP-R	32	159
UF(CS3)	0.15	0.272	Rec.	44.8	St-W	0.47	244	17.5	90	0.96	1.03	191	3	Sem rotura*	52	116
FS(S-2)	0.6	0.51	Rec.	30	Ct-W	0.56	240	16	90	0.14	3.63	195	2.5	CFRP-R	243	691
FS(S-3)	0.6	0.51	Rec.	30	Ct-W	1.1	240	16	90	0.14	3.63	195	2.5	CFRP-R	346	795
FS(S-4)	0.6	0.51	Rec.	30	Ct-W	1.67	240	16	90	0.14	3.63	195	2.5	Sem rotura*	493	942
T(S4)	0.18	0.46	Rec.	48.5	Ct-S	8.9	70.8	10	45	0	1.94	200	2.6	CFRP-R	211	331
T(SR1)	0.18	0.46	Rec.	53.8	St-S	4.4	70.8	10	45	0	1.94	200	3.5	CFRP-D	89	195
T(SR2)	0.18	0.46	Rec.	52.7	Ct-S	8.9	70.8	10	45	0	1.94	200	2.6	CFRP-D	123	243
MT(A)	0.15	0.22	Rec.	28.5	Ct-W	3.7	230	15	90	0.26	1.2	200	1.14	CFRP-R	40.2	134.4
MT(B)	0.15	0.22	Rec.	28.5	Ct-W	3.7	230	15	90	0.26	1.2	200	1.14	CFRP-R	43.2	137.3
MT(C)	0.15	0.22	Rec.	28.5	Ct-W	3.7	230	15	90	0.26	1.2	200	1.14	CFRP-R	34.5	128.5
MT(D)	0.15	0.22	Rec.	28.5	Ct-W	3.7	230	15	90	0.26	1.2	200	1.59	CFRP-R	55.4	126.5
MT(E)	0.15	0.22	Rec.	28.5	Ct-W	3.7	230	15	90	0.26	1.2	200	1.59	CFRP-R	38	108.9
MT(F)	0.15	0.22	Rec.	28.5	Ct-W	3.7	230	15	90	0.26	1.2	200	1.59	CFRP-R	18	88.8
TR(S1a)	0.07	0.1	Rec.	30	St-S	2.2	235	14	90	0	1.44	200	3.2	CFRP-D	13.55	21.75
TR(S1b)	0.07	0.1	Rec.	30	St-S	2.2	235	14	90	0	1.44	200	3.2	CFRP-D	11.25	19.45
TR(S2a)	0.07	0.1	Rec.	30	St-S	3.3	235	14	90	0	1.44	200	3.2	CFRP-D	15.85	24.05
TR(S2b)	0.07	0.1	Rec.	30	St-S	3.3	235	14	90	0	1.44	200	3.2	CFRP-D	12.9	21.1
TR(S3a)	0.07	0.1	Rec.	30	St-S	4.4	235	14	90	0	1.44	200	3.2	CFRP-D	13.2	21.4
TR(S3b)	0.07	0.1	Rec.	30	St-S	4.4	235	14	90	0	1.44	200	3.2	CFRP-D	10.55	18.75
TR(S1-45)	0.07	0.1	Rec.	30	St-S	2.2	235	14	45	0	1.44	200	3.2	CFRP-D	14.05	22.25
TR(S2-45)	0.07	0.1	Rec.	30	St-S	3.3	235	14	45	0	1.44	200	3.2	CFRP-D	15.45	23.65
TR(S3-45)	0.07	0.1	Rec.	30	St-S	4.4	235	14	45	0	1.44	200	3.2	CFRP-D	12.5	20.35
CH1(RS90)	0.15	0.21	Rec.	35	St-S	6.7	150	14	90	0.19	1.9	200	2.5	CFRP-D	38	91.25
CH1(RS135)	0.15	0.21	Rec.	35	St-S	4.4	150	14	45	0.19	1.9	200	2.5	CFRP-D	43.5	96.75
KH3(SO3-2)	0.15	0.255	Rec.	27.5	St-U	0.88	228	16.6	90	0	4.2	200	3	CFRP-D	54	131
KH3(SO3-3)	0.15	0.255	Rec.	27.5	St-U	1.32	228	16.6	90	0	4.2	200	3	CFRP-D	56.5	133.5
KH3(SO3-4)	0.15	0.255	Rec.	27.5	Ct-U	2.2	228	16.6	90	0	4.2	200	3	CFRP-D	67.5	144.5
KH3(SO4-2)	0.15	0.255	Rec.	27.5	St-U	0.88	228	16.6	90	0	4.2	200	4	CFRP-D	62.5	127.5
KH1(CO2)	0.15	0.355	Rec.	20.5	St-U	0.88	228	16.6	90	0	4.2	200	3.6	CFRP-D	40	88
KH1(CO3)	0.15	0.355	Rec.	20.5	Ct-U	2.2	228	16.6	90	0	4.2	200	3.6	CFRP-D	65	113
KH2(BT2)	0.15	0.355	T-	35	Ct-U	2.2	228	16.6	90	0	2.31	200	3	CFRP-D	65	155
KH2(BT3)	0.15	0.355	T-	35	Ct-U	2.2	228	16.6	90	0	2.31	200	3	CFRP-D	67.5	157.5
KH2(BT4)	0.15	0.355	T-	35	St-U	0.88	228	16.6	90	0	2.31	200	3	CFRP-D	72	162
KH2(BT5)	0.15	0.355	T-	35	St-S	0.88	228	16.6	90	0	2.31	200	3	CFRP-D	31.5	121.5
DE1(T6NS-C45)	0.14	0.54	T-	44.1	St-U	2.22	230	15	45	0	2.81	200	2.9	CFRP-D	103.5	213.6
DE1(T6S4-C90)	0.14	0.54	T-	44.1	St-U	1.57	230	15	90	0.1	2.81	200	2.9	CFRP-D	85.25	272.8
DE2(T4S2-C45)	0.14	0.34	T-	29.4	St-U	2.22	230	15	45	0.2	2.23	200	3.2	CFRP-D	17.8	219.05
CH2(G5.5-1L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	2.37	231	16	90	1.1	3.6	203	2	CFRP-R	31.15	320.23
CH2(G5.5-2L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	4.75	231	16	90	1.1	3.6	203	2	CFRP-R	53.4	342.51
CH2(G8-1L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	2.37	231	16	90	0.76	3.6	203	2	CFRP-R	31.15	298
CH2(G8-2L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	4.75	231	16	90	0.76	3.6	203	2	CFRP-R	62.3	329.2
CH2(G8-3L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	7.12	231	16	90	0.76	3.6	203	2	CFRP-R	84.55	351.41
CH2(G16-1L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	2.37	231	16	90	0.38	3.6	203	2	CFRP-R	40.05	275.8
CH2(G16-2L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	4.75	231	16	90	0.38	3.6	203	2	CFRP-R	84.55	320.3
CH2(G24-1L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	2.37	231	16	90	0.25	3.6	203	2	CFRP-R	53.4	258
CH2(G24-2L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	4.75	231	16	90	0.25	3.6	203	2	CFRP-R	48.95	253.6
CH2(G24-3L)	0.092	0.343	T-	37.9	Ct-U	7.12	231	16	90	0.25	3.6	203	2	CFRP-R	53.4	258
DB1 (A12_M)	0.15	0.273	Rec.	49.2	St-U	1.17	390	8	90	0	1.1	200	2.2	CFRP-D	31.5	89.8
DB1 (B10_M)	0.15	0.123	Rec.	56.2	St-U	1.39	390	8	90	0	1.69	200	2.4	CFRP-D	18.6	55.6
DB1 (B12_M)	0.15	0.123	Rec.	56.2	St-U	2.78	390	8	90	0	2.45	200	2.4	CFRP-D	33.7	71.5
AD (C-1)	0.3	0.245	Rec.	37.2	Ct-U	1.11	230	15	90	0	4.38	207	4	CFRP-D	53	165

Tabela 2.12 (cont.) - Resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte por intermédio da colagem externa de CFRP.

Modelo	b_w [m]	d [m]	Secção	f_c [MPa]	Configuração	ρ_f [%]	E_f [GPa]	ε_{fu} [%]	θ_f [°]	ρ_{sw} [%]	ρ_{sl} [%]	E_s [GPa]	a/d	Modo de rotura	V_f [kN]	V_{total} [kN]
PM1 (TR30C2)	0.15	0.25	Rec.	27.5	Ct-S	2.2	234	19	90	0	**	210	3	CFRP-D	45.3	120
PM1 (TR30C3)	0.15	0.25	Rec.	27.5	Ct-S	6.6	234	19	90	0	**	210	3	CFRP-D	38.1	112.8
PM1 (TR30C4)	0.15	0.25	Rec.	27.5	Ct-S	6.6	234	19	90	0	**	210	3	CFRP-D	65.5	140.2
PM1 (TR30D10)	0.15	0.25	Rec.	31.4	Ct-S	4.4	234	19	90	0	**	210	3	CFRP-D	31.5	193
PM1 (TR30D2)	0.15	0.25	Rec.	31.4	Ct-S	6.6	234	19	90	0.335	**	210	3	CFRP-D	51.8	213.3
PM1 (TR30D20)	0.15	0.25	Rec.	31.4	Ct-S	6.6	234	19	90	0.335	**	210	3	CFRP-D	86	247.5
PM1 (TR30D3)	0.15	0.25	Rec.	31.4	Ct-S	2.2	234	19	90	0.335	**	210	3	CFRP-D	0	161.4
PM1 (TR30D4)	0.15	0.25	Rec.	31.4	Ct-S	4.4	234	19	90	0.335	**	210	3	CFRP-D	47.3	208.8
PM1 (TR30D40)	0.15	0.25	Rec.	31.4	Ct-S	4.4	234	19	90	0.335	**	210	3	CFRP-D	50.5	212
BO1 (DB-S0-1L)	0.095	0.175	T	25.5	Ct - U	1.39	243	13.0	90	0.0	3.61	165	1.5	Sem rotura*	15.4	162.2
BO1 (DB-S0-2L)	0.095	0.175	T	25.5	Ct - U	2.79	243	13.0	90	0.0	3.61	165	1.5	Sem rotura*	13.8	160.6
BO1 (DB-S1-1L)	0.095	0.175	T	25.5	Ct - U	1.39	243	13.0	90	0.38	3.61	165	1.5	Sem rotura*	12.7	162.5
BO1 (DB-S1-2L)	0.095	0.175	T	25.5	Ct - U	2.79	243	13.0	90	0.38	3.61	165	1.5	Sem rotura*	17.0	166.8
BO1 (SB-S0-1L)	0.095	0.175	T	25.5	Ct - U	1.39	243	13.0	90	0.0	3.61	165	3.0	Sem rotura*	23.2	59.3
BO1 (SB-S0-2L)	0.095	0.175	T	25.5	Ct - U	2.79	243	13.0	90	0.0	3.61	165	3.0	Sem rotura*	32.4	68.5
BO1 (SB-S1-1L)	0.095	0.175	T	25.5	Ct - U	1.39	243	13.0	90	0.38	3.61	165	3.0	Sem rotura*	2.8	95.7
BO1 (SB-S1-2L)	0.095	0.175	T	25.5	Ct - U	2.79	243	13.0	90	0.38	3.61	165	3.0	Sem rotura*	12.2	105.1
BO2 (DB-S0-0.5L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	0.79	243	13.0	90	0.0	3.76	215	1.5	Sem rotura*	90.1	268.2
BO2 (DB-S0-1L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	1.41	243	13.0	90	0.0	3.76	215	1.5	Sem rotura*	107.4	285.5
BO2 (DB-S0-2L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	2.82	243	13.0	90	0.0	3.76	215	1.5	Sem rotura*	110.9	289.0
BO2 (DB-S1-1L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	1.41	243	13.0	90	0.38	3.76	215	1.5	Sem rotura*	32.0	355.5
BO2 (DB-S1-2L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	2.82	243	13.0	90	0.38	3.76	215	1.5	Sem rotura*	34.2	357.7
BO2 (DB-S2-1L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	1.41	243	13.0	90	0.75	3.76	215	1.5	Sem rotura*	57.9	389.7
BO2 (DB-S2-2L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	2.82	243	13.0	90	0.75	3.76	215	1.5	Sem rotura*	73.0	404.8
BO2 (SB-S0-0.5L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	0.79	243	13.0	90	0.0	3.76	215	3.0	Sem rotura*	21.2	102.4
BO2 (SB-S0-1L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	1.41	243	13.0	90	0.0	3.76	215	3.0	Sem rotura*	38.7	120.0
BO2 (SB-S0-2L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	2.82	243	13.0	90	0.0	3.76	215	3.0	Sem rotura*	40.4	121.7
BO2 (SB-S1-0.5L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	0.79	243	13.0	90	0.38	3.76	215	3.0	Sem rotura*	19.2	282.0
BO2 (SB-S1-2L)	0.152	0.35	T	25.0	Ct - U	2.82	243	13.0	90	0.38	3.76	215	3.0	Sem rotura*	4.4	267.2
JA (BT1-1)	0.12	0.31	Rec.	27.38	St - U	0.8	230	16.5	90	0.0	1.69	200	2.5	CFRP-R	18.3	67.4
JA (BT1-1I)	0.12	0.31	Rec.	27.38	St - U	0.8	230	16.5	90	0.0	1.69	200	2.5	CFRP-R	38.3	87.3
JA (BT1-2I)	0.12	0.31	Rec.	27.38	St - U	0.6	230	16.5	90	0.0	1.69	200	2.5	CFRP-R	18.3	67.4
JA (BS1-1I)	0.12	0.31	Rec.	27.38	St - U	0.8	230	16.5	90	0.0	1.08	200	2.5	CFRP-R	23.3	60.7
JA (BS1-2)	0.12	0.31	Rec.	27.38	St - U	0.6	230	16.5	90	0.0	1.08	200	2.5	CFRP-R	13.3	50.7
JA (BT2-1)	0.12	0.31	Rec.	16.73	St - U	0.8	230	16.5	90	0.0	1.69	200	4.0	CFRP-R	34.9	67.4
JA (BT2-2)	0.12	0.31	Rec.	16.73	St - L	0.8	230	16.5	45	0.0	1.69	200	4.0	CFRP-R	28.3	60.7
JA (BT2-2I)	0.12	0.31	Rec.	16.73	St - L	0.8	230	16.5	45	0.0	1.69	200	4.0	CFRP-R	44.9	77.3
PM2 (A-U1-C-17)	0.15	0.25	Rec.	41.40	Ct - U	2.2	230	15.0	90	0.39	7.54	200	3.0	CFRP-D	52.9	238.1
PM2 (A-U1-C-20)	0.15	0.25	Rec.	41.40	Ct - U	2.2	230	15.0	90	0.34	7.54	200	3.0	CFRP-D	55.8	225.0
PM2 (A-U1-S-17)	0.15	0.25	Rec.	41.40	Ct - U	2.2	230	15.0	90	0.39	7.54	200	3.0	CFRP-D	49.1	247.3
PM2 (A-U1-S-20)	0.15	0.25	Rec.	41.40	Ct - U	2.2	230	15.0	90	0.39	7.54	200	3.0	CFRP-D	31.7	235.1
PM2 (A-U2-C-17)	0.15	0.25	Rec.	41.40	Ct - U	4.4	230	15.0	90	0.39	7.54	200	3.0	CFRP-D	57.8	243.0
PM2 (A-U2-C-20)	0.15	0.25	Rec.	41.40	Ct - U	4.4	230	15.0	90	0.34	7.54	200	3.0	CFRP-D	60.5	229.7
PM2 (A-U2-S-17)	0.15	0.25	Rec.	41.40	Ct - U	4.4	230	15.0	90	0.39	7.54	200	3.0	CFRP-D	20.8	218.9
PM2 (A-U2-S-20)	0.15	0.25	Rec.	41.40	Ct - U	4.4	230	15.0	90	0.34	7.54	200	3.0	CFRP-D	4.0	207.5
DB2 (2S-4M-B)	0.18	0.36	T	39.70	St - U	0.7	218.4	13.3	90	0.10	2.8	200	2.5	CFRP-D	4.4	186.7
DB2 (2S-7M(1)-B)	0.18	0.36	T	39.70	St - U	1	218.4	13.3	90	0.10	2.8	200	2.5	CFRP-D	12.8	195.1
DB2 (2S-7M(2)-B)	0.18	0.36	T	39.70	St - U	2.1	218.4	13.3	90	0.10	2.8	200	2.5	CFRP-D	39.8	222.1
DB2 (4S-4M-B)	0.18	0.36	T	39.70	St - U	0.7	218.4	13.3	90	0.10	2.8	200	2.5	CFRP-D	27.5	250.4
DB2 (4S-7M(1)-B)	0.18	0.36	T	39.70	St - U	1	218.4	13.3	90	0.10	2.8	200	2.5	CFRP-D	31.0	253.8
CA (A2)	0.15	0.2225	Rec.	30.50	St - W	0.67	249	14.6	90	0.19	4.41	200	2.7	CFRP-R	29.0	185.0
CA (A3)	0.15	0.2225	Rec.	30.50	St - W	0.45	249	14.6	90	0.19	4.41	200	2.7	CFRP-R	21.0	187.0
CA (A5)	0.15	0.2225	Rec.	30.50	St - W	0.67	249	14.6	90	0.19	4.41	200	1.8	CFRP-R	25.0	227.0
CA (A6)	0.15	0.2225	Rec.	30.50	St - W	1.34	249	14.6	90	0.19	4.41	200	1.8	CFRP-R	27.0	217.0

Notas:

1) U = Uji (1992); SU = Sato (1996); MI = Miyauchi (1997); TK = Taerwe (1997); SUK = Sato (1997); UF = Umezu (1997); FS = Funakawa (1997); T = Taljsten (1997); MT = Mitsui (1998); TR = Triantafillou (1998); CH1 = Chaallal (1998); KH1 = Khalifa (1999); KH2 = Khalifa (2000); KH3 = Khalifa (2002); DE1 = Deniaud (2001); DE2 = Deniaud (2003); CH2 = Chaallal (2002); DB1 = Dias (Capítulo 3 desta dissertação); AD = Adhikary (2004); PM1 = Pelegrino (2002); BO1 = Bousselham (2006-a); BO2 = Bousselham (2006-b); JA = Jayaprakash (2007); PM2 = Pelegrino (2006); DB2 = Dias (Capítulo 4 desta dissertação); CA = Cao (2005).

2) Rec. = Secção rectangular; T = Secção em T.

3) Ct = Reforço contínuo de CFRP; St = Reforço discreto de CFRP.

4) W = Reforço de CFRP envolvendo toda a secção; U = Reforço de CFRP em forma de U; S = Reforço de CFRP nas faces laterais.

* Modelos em que não ocorreu rotura (modelos TK(BS7), UF(CS1) e UF(CS3)) ou ocorreu rotura pelo esmagamento da biela de compressão (modelos ensaiados por Bousselham (2006-a) e Bousselham (2006-b)).

** Não existe informação em relação a este parâmetro.

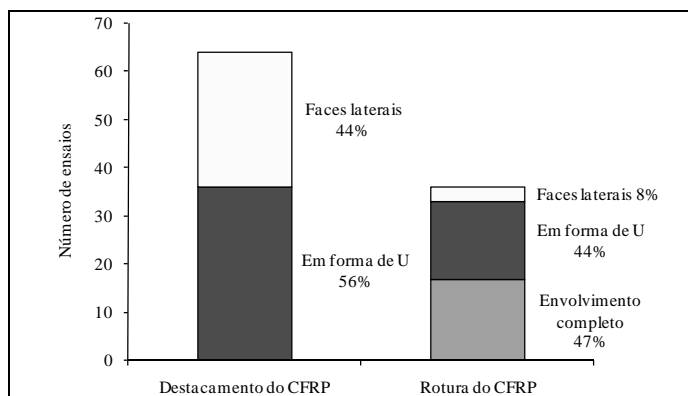


Figura 2.38 - Associação da configuração de reforço ao modo de rotura.

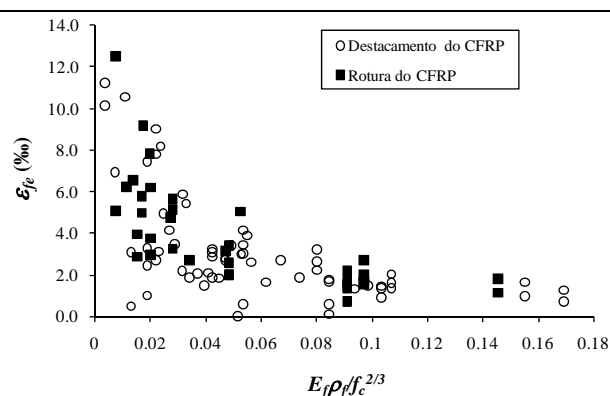


Figura 2.39 - Relação ε_{fe} vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$.

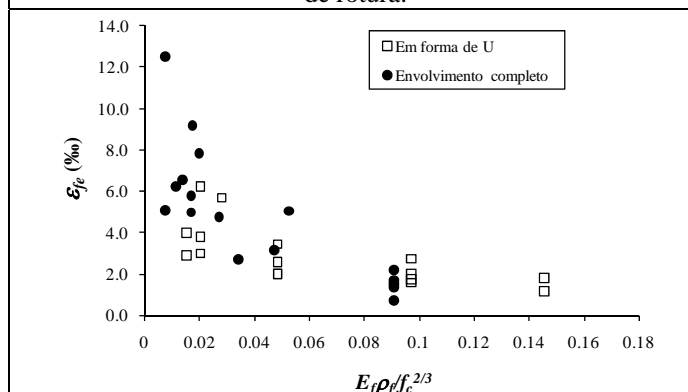


Figura 2.40 - Relação ε_{fe} vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ para os modelos com rotura do CFRP.

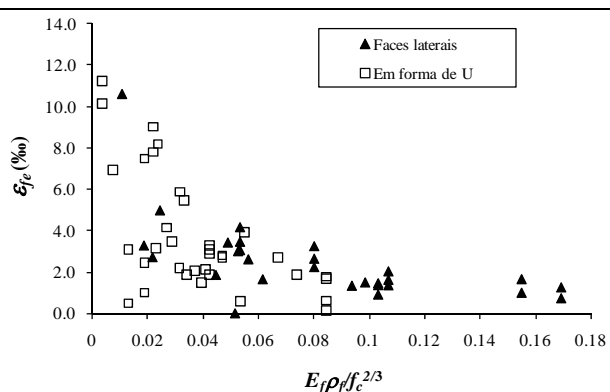


Figura 2.41 - Relação ε_{fe} vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ para os modelos com rotura por destacamento do CFRP.

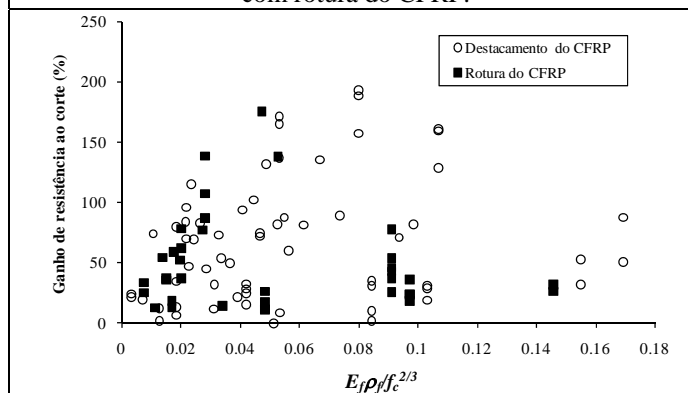


Figura 2.42 - Relação ganho de resistência ao corte vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$.

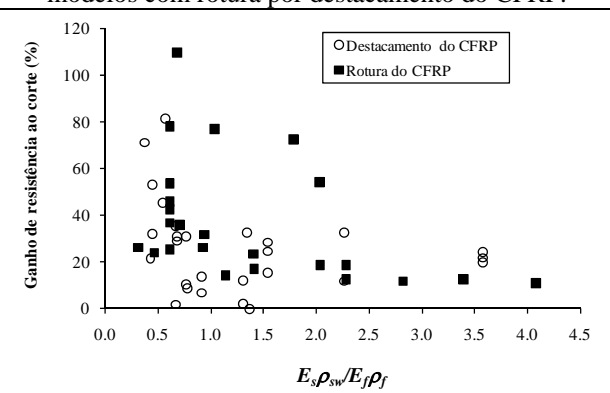


Figura 2.43 - Relação ganho de resistência ao corte vs $E_s \rho_{sw} / E_f \rho_f$ (efeito da presença de estribos).

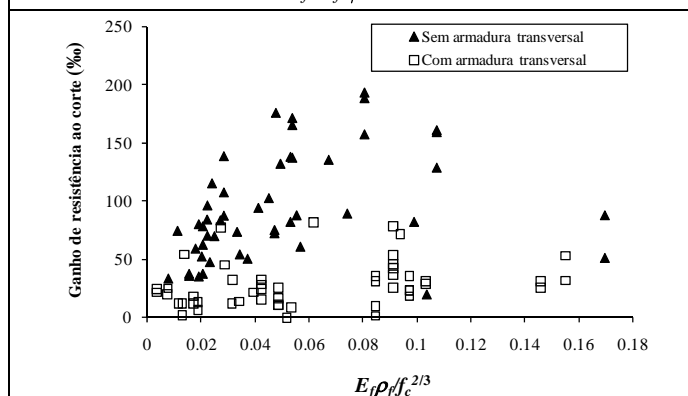


Figura 2.44 - Relação ganho de resistência ao corte vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ (efeito da presença de estribos).

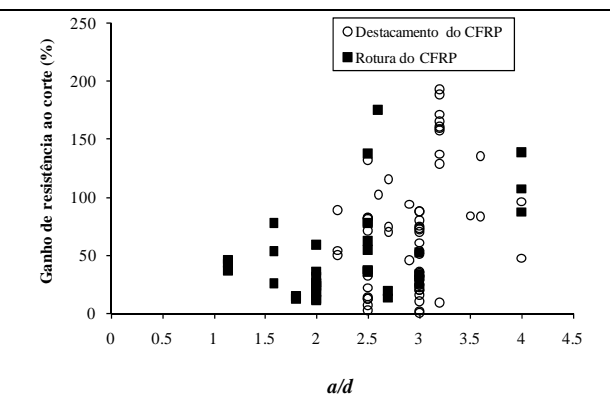


Figura 2.45 - Relação ganho de resistência ao corte vs valor de a/d .

A análise da Figura 2.38 permite constatar que o modo de rotura que ocorreu em maior número de casos (64%) foi o destacamento do reforço. A rotura do CFRP aconteceu em apenas 36% dos casos. O destacamento do CFRP ocorreu em modelos com o reforço aplicado nas faces laterais das vigas e em modelos com o reforço aplicado em forma de U. Para esta configuração de reforço constata-se que maioritariamente o modo de rotura foi o destacamento do CFRP. Os modelos com o CFRP a envolver toda a secção tiveram um único modo de rotura e que foi a rotura do CFRP. Ao reforço aplicado nas faces laterais esteve essencialmente associado o modo de rotura por destacamento do CFRP.

Na Figura 2.39 apresenta-se, para os modos de rotura por destacamento do CFRP e por rotura do CFRP, a relação entre a extensão efectiva ε_{fe} definida por (2.2) e o parâmetro $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$, que engloba a rigidez axial do reforço de CFRP ($E_f \rho_f$) e o tipo de betão das vigas por intermédio do valor da resistência à compressão (f_c). Na análise da referida figura é possível verificar que a efectividade do reforço (ε_{fe}) depende da grandeza do parâmetro $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$. Concretamente, o nível de rendimento do CFRP (ε_{fe}) diminui com o aumento do valor da rigidez axial do reforço de CFRP e aumenta com a classe de resistência do betão. No primeiro caso, uma maior rigidez conduz necessariamente a uma mobilização mais rápida da aderência, podendo assim surgir roturas prematuras mais precoces. Por outro lado, a uma maior resistência do betão está associado um incremento da aderência, o que pode originar um retardamento da ocorrência de roturas prematuras, ou mesmo a rotura do CFRP.

A análise da Figura 2.40 (modelos com rotura do CFRP) permite concluir que a gama de valores da efectividade do reforço ε_{fe} é maior no caso dos modelos em que o reforço envolve toda a secção, comparativamente com o reforço em forma de U. Nos modelos com modo de rotura por destacamento de CFRP (Figura 2.41) os valores mais baixos de ε_{fe} registaram-se para o caso do reforço aplicado apenas nas faces laterais. Para esta configuração de reforço, o parâmetro ε_{fe} não apresenta grande variação em função do parâmetro $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$.

A análise destes níveis de rendimento do CFRP em função da configuração de reforço deve incluir o aspecto do grau de complexidade da execução em obra das soluções de reforço. Se a colagem nas faces laterais apenas exige a preparação da superfície das mesmas, a colagem do CFRP em forma de U requer adicionalmente o tratamento (arredondamento) nas arestas, para evitar o fenómeno de concentração de tensões e uma rotura prematura do CFRP. Se o grau de dificuldade de aplicação do reforço de CFRP não aumenta significativamente ao passar da configuração de reforço colado apenas

nas faces laterais para a configuração de reforço em forma de U, o mesmo não acontece quando se analisa uma solução de reforço que envolve toda a secção. Com efeito esta configuração de reforço em muitas das aplicações práticas não é concretizável ou, na melhor das hipóteses, não é facilmente concretizável. Desta forma, a solução de reforço com CFRP aplicado segundo a técnica EBR que tem como modo de rotura típico a ruína do CFRP (envolvimento completo da secção transversal) pode não ser viável do ponto de vista da sua execução. Face ao exposto, a configuração de reforço que melhor concilia o desempenho do CFRP com a facilidade de execução em obra é o reforço em forma de U.

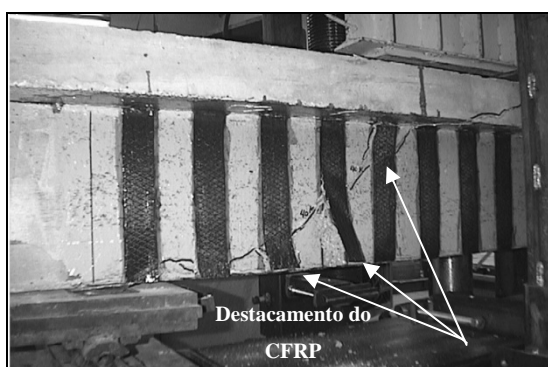
O ganho de resistência ao esforço transversal, definido por (2.1) aumenta com o parâmetro $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ até um determinado valor (cerca de 0.05), a partir do qual há uma tendência de estabilização de acordo com o que se pode observar na Figura 2.42, ou seja, a partir de uma determinada quantidade de reforço o acréscimo do ganho de resistência ao esforço transversal tende a não ser significativo. Este aspecto, naturalmente, apresenta uma importância relevante em termos de uma análise eficácia/custo da solução de reforço.

Na Figura 2.43 encontra-se ilustrado o modo como o valor do ganho da resistência ao esforço transversal varia com a percentagem de estribos de aço. Tal como se referiu anteriormente, o ganho de resistência ao corte proporcionado pelo CFRP diminui à medida que a relação $E_s \rho_w / E_f \rho_f$ aumenta. Esta tendência é válida quer para os modelos com rotura por destacamento do CFRP como para os modelos com modo de ruína por rotura do CFRP. A análise da Figura 2.44 permite constatar que o acréscimo de carga proporcionado pelo reforço de CFRP foi mais significativo para o caso das vigas sem armaduras de esforço transversal.

A Figura 2.45 apresenta a relação entre o ganho de resistência ao esforço transversal e o parâmetro a/d , onde se podem distinguir três zonas: a) a zona correspondente a valores de a/d menores que 2.0, onde o modo de rotura predominante foi a rotura do CFRP; b) a zona correspondente a a/d maior que 3.2 onde o modo de rotura predominante foi o destacamento do CFRP; c) a zona de transição $2.0 \leq a/d \leq 3.2$ onde ocorreram os dois modos de rotura: destacamento do CFRP e rotura do CFRP. O ganho de resistência proporcionado pelo CFRP foi mais evidente no caso das vigas regulares $a/d \geq 2.0$ e menos evidente nas vigas baixas $a/d < 2.0$. O efeito de arco presente nestas vigas pode justificar este facto, uma vez que existe a possibilidade da carga se transmitir directamente para o apoio.

Os diversos estudos realizados são unânimes quanto ao facto da colagem externa de CFRP (mantas e laminados) permitir aumentos consideráveis da resistência ao corte de vigas de betão armado. No

entanto, para as configurações mais fáceis de aplicação em obra (reforço em forma de U ou reforço colado apenas nas faces laterais) o modo de rotura que tipicamente ocorre é o destacamento prematuro do CFRP (ver Figura 2.46), ao qual está associado um baixo nível de mobilização do reforço (bastante inferior à sua resistência última). Tal como já foi referido na secção 2.2, além do desaproveitamento do material, os referidos modos de rotura são frágeis. Adicionalmente, existe uma susceptibilidade grande dos CFRP colados externamente à acção do fogo, às condições ambientais adversas, a actos de vandalismo e ao impacto. Estes aspectos realçam a necessidade de medidas que evitem ou retardem o destacamento precoce do CFRP, como é o caso da adopção de mecanismos de ancoragem nas configurações em forma de U (Figura 2.28.e-ii) e de medidas de protecção do CFRP.



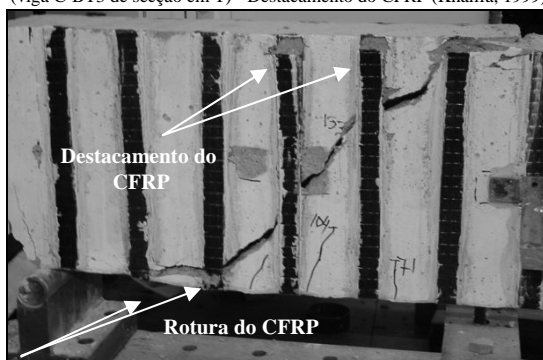
Faixas discretas de manta de CFRP coladas nas faces laterais da viga de secção em T (viga C-BT5) - Destacamento do CFRP (Khalifa, 1999).



Manta contínua de CFRP colada em forma de U (viga C-BT3 de secção em T) - Destacamento do CFRP (Khalifa, 1999).



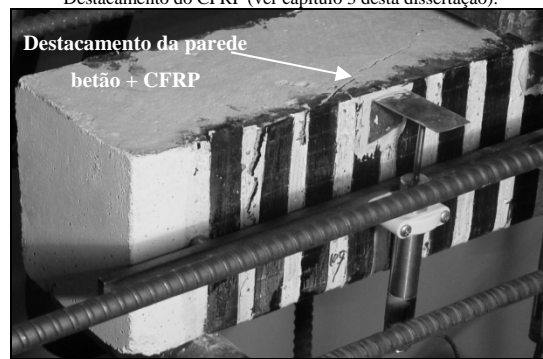
Faixas discretas de manta de CFRP em forma de U (Viga C-BT4 de secção em T) - Destacamento do CFRP (Khalifa, 1999).



Faixas discretas de manta de CFRP em forma de U (viga de secção rectangular) - Destacamento do CFRP (ver capítulo 3 desta dissertação).



Manta contínua de CFRP colada em forma de U (viga de secção rectangular) - Destacamento da parede betão+CFRP (Khalifa, 1999).



Faixas discretas de manta de CFRP em forma de U (viga de secção rectangular) - Destacamento da parede betão + CFRP (ver capítulo 3 desta dissertação).

Figura 2.46 - Roturas típicas de vigas reforçadas ao corte com CFRP usando a técnica EBR: CFRP aplicado em forma de U ou aplicado apenas nas faces laterais.

2.3.3 - Aplicação da técnica da inserção com varões de CFRP

Em alternativa à técnica da colagem externa de CFRP (EBR) aplicado no reforço ao corte, De Lorenzis e Nanni (2001) utilizaram varões de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais de vigas de betão armado (Figura 2.26-c). Esta técnica de reforço (NSM) permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga das vigas. Além disto, a técnica NSM, relativamente à técnica EBR, garante uma maior protecção do reforço, pois este encontra-se inserido no elemento e não colado externamente. Outras vantagens da técnica NSM relativamente à técnica EBR foram referidas na secção 2.2 deste capítulo.

De Lorenzis e Nanni (2001) ensaiaram oito vigas à flexão sob quatro pontos de carga (Figura 2.47), de secção transversal em T com 4.5 m de vão (o valor do comprimento do vão de corte era três vezes o da altura útil da viga). A armadura longitudinal de tracção da viga foi dimensionada por forma a que rotura das vigas fosse por corte. Os varões de CFRP com 9.5 mm de diâmetro tinham uma resistência à tracção de 1875 MPa e um módulo de elasticidade de 104.8 GPa. Os parâmetros avaliados foram: espaçamento dos varões de CFRP; orientação do reforço (varões inseridos em entalhes verticais e inclinados a 45°); ancoragem dos varões de CFRP no banzo da viga; presença de armaduras transversais (estribos). Na Tabela 2.13 estão registados os dados principais das vigas ensaiadas. Na Figura 2.48 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga aplicada e o deslocamento central das vigas sem estribos de aço (ver Tabela 2.13).

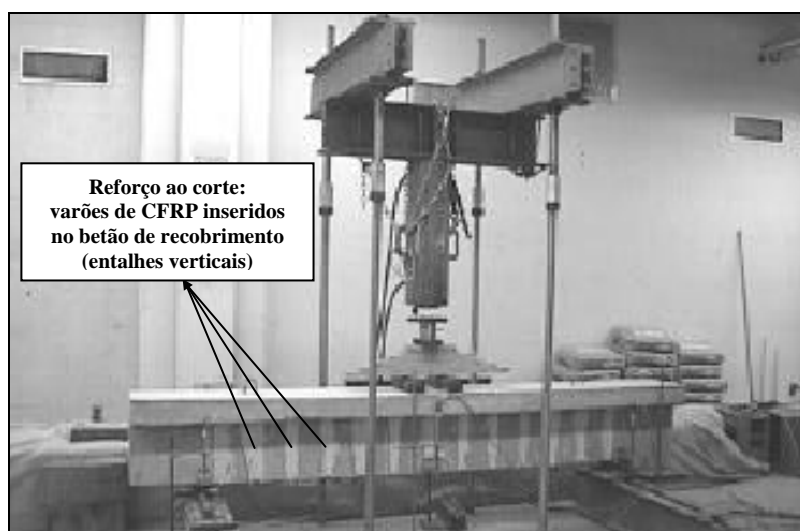


Figura 2.47 - Tipo de ensaio realizado por De Lorenzis e Nanni (2001).

Dos valores de carga de rotura incluídos na Tabela 2.13 verifica-se que os varões de CFRP inseridos em entalhes executados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas proporcionaram um aumento significativo da capacidade de carga das correspondentes vigas de referência (sem reforço).

Para as vigas sem estribos de aço, o aumento da capacidade de carga máxima variou entre os 27.6% e os 105.6%, enquanto que na viga que contém alguma percentagem de estribos o reforço proporcionou um ganho de resistência de 35%. Constatou-se ainda que a resistência ao esforço transversal pode ser aumentada diminuindo o espaçamento dos varões, ancorando os varões ao banzo da viga, ou dispondo os varões com 45° de inclinação (mantendo o número de varões). Diminuindo o espaçamento dos varões de CFRP de 178 mm para 127 mm, o qual corresponde a um aumento da quantidade de reforço de 40%, o incremento da capacidade máxima de carga das vigas foi de 10.8% e 7.5%, respectivamente, para o caso de varões verticais e varões inclinados a 45°. O recurso a varões inclinados a 45° em vez de varões verticais, que corresponde a um incremento de 41.4% na quantidade de reforço, aumentou a capacidade de carga das vigas em 43.6% e 39.4%, respectivamente, para o caso de espaçamentos de 178 mm e 127 mm. Finalmente, ancorando os varões de CFRP verticais no banzo da viga (aumento em 33% da quantidade de reforço utilizada) verificou-se um aumento da capacidade de carga de 45.5%. Dos resultados experimentais verifica-se que o processo mais eficiente é ancorar os varões ao banzo da viga. A solução com varões inclinados proporcionou melhores resultados que os registados nos modelos em que se diminui o espaçamento dos varões verticais de CFRP.

Tabela 2.13 - Modelos ensaiados por De Lorenzis e Nanni (2001).

Vigas	Presença de estribos	Reforço ao corte com varões de CFRP	Carga de rotura * [kN]	Modo de Rotura **
BV		-	180.6	SC
B90-7		2 varões de $\phi 9.5@178$ mm (verticais)	230.4 (27.6%)	BF
B90-5		2 varões de $\phi 9.5@127$ mm (verticais)	255.3 (41.4%)	BF
B90-5A	-	2 varões de $\phi 9.5@127$ mm (verticais e ancorados)	371.4 (105.6%)	SP
B45-7		2 varões de $\phi 9.5@178$ mm (inclinados a 45°)	330.9 (83.2%)	BF
B45-5		2 varões de $\phi 9.5@127$ mm (inclinados a 45°)	355.8 (97%)	SP
BSV		-	306.5	SC
BS90-7A	2 ramos $\phi 9.5@356$ mm	2 varões de $\phi 9.5@178$ mm (verticais e ancorados)	413.7 (35%)	SP + FF

* Entre parêntesis curvos: ganho de resistência conferido pelo CFRP; ** SC: Rotura por abertura excessiva de uma fenda de corte; BF: Deslizamento de varões de CFRP; SP: Destacamento do betão de recobrimento das armaduras longitudinais e FF: Rotura por flexão.

Nos ensaios realizados com vigas reforçadas ao corte por inserção de varões de CFRP ocorreram dois tipos de mecanismos de rotura: deslizamento de um ou mais varões de CFRP ou o destacamento do

betão de recobrimento das armaduras longitudinais. Exemplos destes modos de ruína estão ilustrados na Figura 2.49: viga B45-7 para o primeiro modo de rotura e viga B90-5A para o segundo modo de rotura.

De Lorenzis e Nanni (2001) demonstraram que o modo de rotura por deslizamento dos varões pode ser ultrapassado ancorando os varões no banzo das vigas (viga B90-5A) ou usando varões inclinados com espaçamento apropriado (viga B45-5). Ambas as soluções conduziram a maiores comprimentos de selagem dos varões de CFRP. Com o modo de rotura por deslizamento dos varões contornado, o factor que passou a controlar a rotura das vigas reforçadas foi o destacamento do betão de recobrimento das armaduras longitudinais.

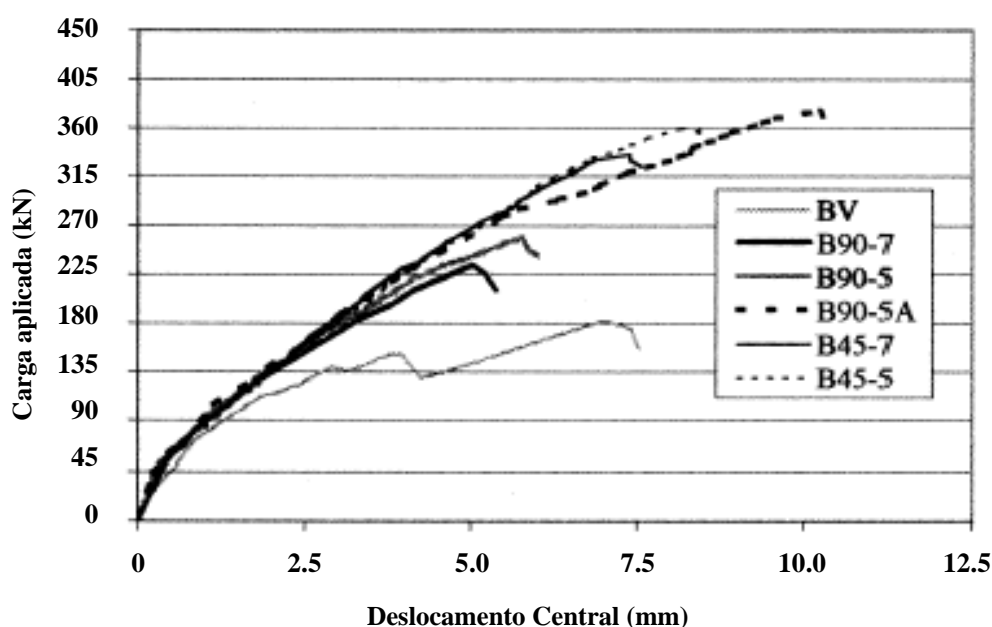
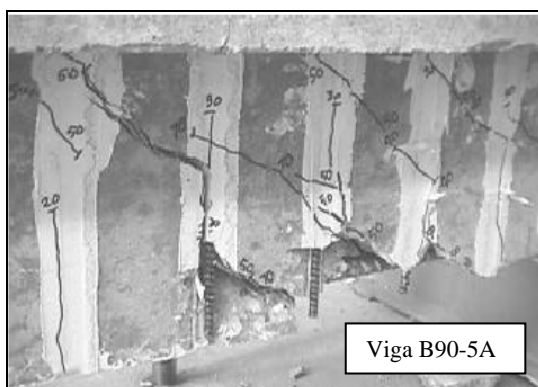


Figura 2.48 - Curvas carga aplicada vs deslocamento central das vigas sem estribos de aço (De Lorenzis e Nanni, 2001).



Varões de CFRP inseridos em entalhes verticais com ancoragem no banzo (rotura por destacamento do betão de recobrimento das armaduras longitudinais)



Varões de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (rotura por deslizamento dos varões de CFRP)

Figura 2.49 - Reforço ao corte de vigas de betão armado com varões de CFRP inseridos no betão de recobrimento das faces laterais das vigas (De Lorenzis e Nanni, 2001).

De Lorenzis e Nanni (2001) utilizaram varões de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais de vigas de betão armado para incrementar a capacidade resistente ao esforço transverso. Esta técnica de reforço permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga das vigas. Além disto, esta técnica garante uma maior protecção do reforço pois este encontra-se inserido no elemento e não colado externamente. No entanto, a utilização de varões de CFRP quando se recorre à técnica NSM apresenta alguns aspectos menos positivos que foram descritos na secção 2.2.2 deste capítulo.

2.3.4 - Proposta da técnica da inserção com laminados de CFRP

Na secção anterior foram descritas duas técnicas de reforço ao corte: a técnica da colagem externa de CFRP (mantas ou laminados) e a técnica da inserção com varões de CFRP. As limitações que lhe foram apontadas justificaram que fosse efectuada investigação para avaliar o desempenho de novas técnicas de reforço ao corte com compósitos de CFRP. Atendendo às vantagens da utilização, quer da técnica NSM face à técnica EBR como dos laminados de CFRP face aos varões de CFRP, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho foi desenvolvido um projecto de investigação, no âmbito da presente dissertação, com o objectivo de avaliar a eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado. Trata-se assim da aplicação no reforço ao corte da técnica já experimentada no reforço à flexão, onde se verificou tratar-se de uma técnica mais eficaz que as baseadas na colagem externa de CFRP, dado que a precocidade da descolagem do CFRP é retardada, sendo mesmo evitada em muitos casos, resultando níveis de deformação mais elevados nos CFRP e aumentos mais significativos na capacidade de carga dos elementos reforçados. Além do aumento da capacidade de carga, também se registou em alguns casos um aumento significativo da capacidade deformacional no momento da rotura dos elementos reforçados. Os ensaios de arranque em flexão realizados revelaram que as tensões máximas de corte alcançadas são significativamente superiores às registadas com técnicas baseadas na colagem exterior de CFRP.

Capítulo 3

Técnica de reforço proposta e validação experimental

Este capítulo tem como objectivos apresentar, detalhadamente, a técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado proposta nesta tese e descrever a campanha de ensaios realizada para a sua validação. A apresentação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado passará pela descrição do escalonamento das tarefas a executar, numa intervenção deste tipo de reforço, e pela exposição de um conjunto de procedimentos que devem ser seguidos por forma a garantir o controlo de qualidade da aplicação do reforço de CFRP. Para tal, serão naturalmente levados em consideração todos os ensinamentos resultantes da experiência adquirida ao longo da investigação experimental realizada para esta dissertação. Conforme foi referido nos capítulos anteriores, o trabalho experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação foi realizado em duas fases. A primeira, executada na parte inicial da investigação, esteve directamente associada à necessidade de validação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado. Esta primeira fase constou da realização de um programa de ensaios experimentais onde modelos de vigas de betão armado, de secção transversal rectangular sem armaduras transversais, foram reforçados ao corte com compósitos de CFRP usando duas técnicas de reforço, a técnica NSM com laminados e a técnica da colagem externa com mantas unidireccionais. Além da realização de uma comparação directa do grau de eficácia das duas técnicas de reforço com CFRP foram, ainda, ensaiados modelos em betão armado com uma percentagem de armadura transversal, conferida por intermédio de estribos de aço, e que quantificada por forma a que estes modelos tivessem uma capacidade máxima de carga semelhante à dos modelos reforçados com CFRP. Desta forma, o comportamento dos modelos com CFRP foi comparado com modelos de betão armado equivalentes em termos de capacidade máxima de carga. O programa de ensaios experimentais realizado será apresentado ao nível da concepção dos modelos adoptados, da caracterização dos materiais utilizados, da aplicação dos reforços de CFRP e do tipo de ensaio usado. Posteriormente, serão apresentados e analisados os resultados obtidos e descritas as conclusões que foram retiradas.

3.1 - A TÉCNICA DA INSERÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP NO REFORÇO AO CORTE

A técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado proposta no âmbito da presente tese, esquematicamente representada na Figura 3.1, consiste na introdução de faixas de laminados de CFRP em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. Os

laminados utilizados têm dimensões de 1.4 mm de espessura e 9.5-10 mm de largura. A sua fixação ao betão é efectuada por intermédio de um adesivo epoxídico.

No Capítulo 2 já foram avançadas as possíveis vantagens desta técnica de reforço em relação à da colagem externa (EBR) com CFRP e em relação à técnica da inserção com varões de CFRP (de secção circular ou quadrada). Em relação à técnica EBR, além de ser mais fácil e rápida de aplicar, a técnica da inserção com laminados de CFRP proporciona uma duplicação da área de colagem do CFRP (Figura 2.11) o que permite aumentar o seu grau de fixação ao betão, ou seja, permite mobilizar tensões mais elevadas no CFRP aquando da rotura do elemento reforçado. O facto dos laminados ficarem inseridos em entalhes, e não colados externamente, aumenta a segurança em relação à actuação do fogo, aos efeitos dos agentes ambientais agressivos e a actos de vandalismo. O recurso à inserção de laminados de CFRP, em detrimento da inserção de varões de CFRP (circulares ou quadrados), apresenta as seguintes vantagens: maior facilidade de execução dos entalhes devido às dimensões da secção transversal dos laminados (a pequena espessura que apresentam justifica apenas que sejam executados finos entalhes, o que não acontece no caso dos varões - ver Figura 2.10); valores mais elevados da relação entre a área de colagem do CFRP e área da secção transversal do CFRP, ou seja, melhores condições de aderência; maior uniformidade da zona de colagem que se traduz numa melhor ancoragem do CFRP ao betão. Assim, é possível adiantar que a técnica de reforço proposta é a mais simples e rápida de executar e permite mobilizar com mais eficácia as elevadas propriedades mecânicas dos CFRP (melhor racionalização do material utilizado).

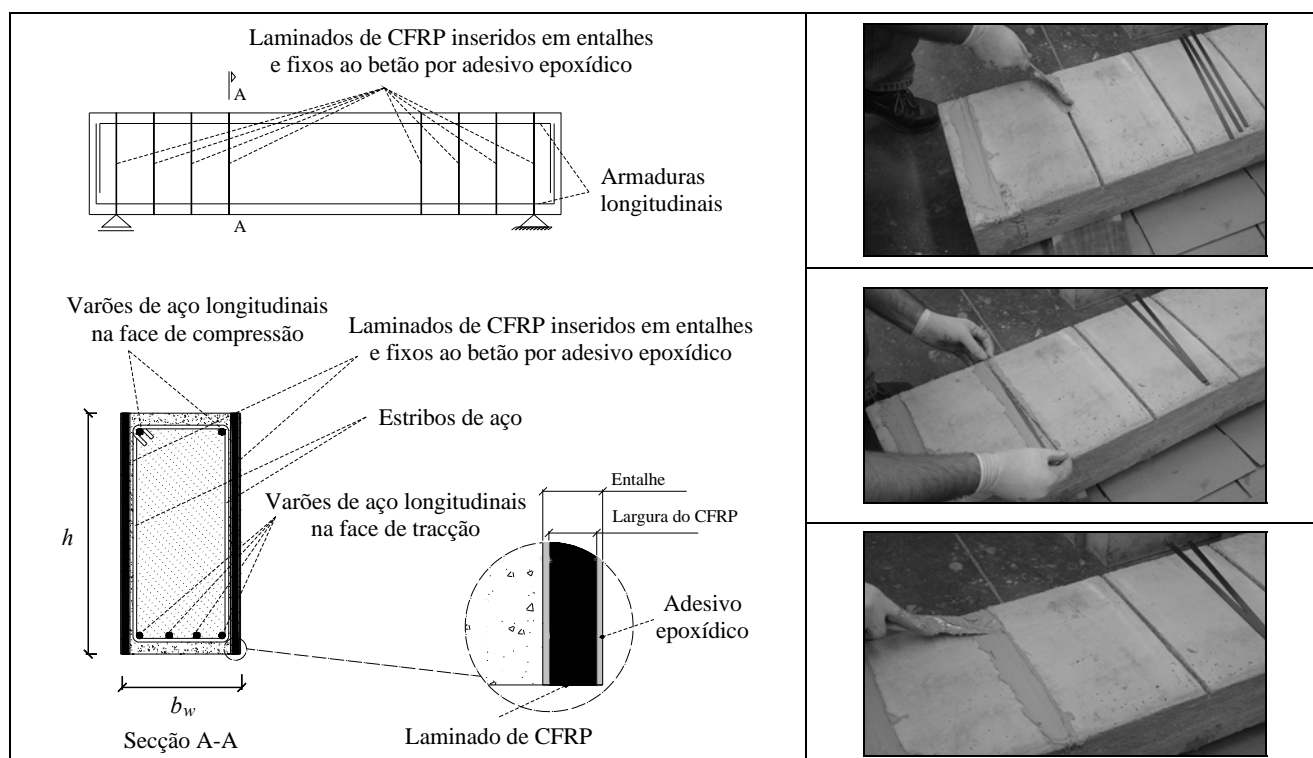


Figura 3.1 - Reforço ao corte de vigas de betão armado recorrendo à inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento.

O desempenho do sistema de reforço proposto depende, no entanto, em boa parte do controlo de qualidade quer nos procedimentos de reforço como dos materiais aplicados. Assim, é fundamental que o aplicador tenha conhecimento das boas práticas de execução da técnica de reforço NSM com laminados de CFRP, que se baseiam na execução de um conjunto de procedimentos, nos quais estão consagrados aspectos que garantam um rigoroso controlo de qualidade da execução do reforço. Os referidos procedimentos, que se encontram compilados no esquema representado na Figura 3.2, são os seguintes:

- Após a marcação da posição exacta dos entalhes (Figura 3.3-a), estes são executados nas faces dos elementos a reforçar, com cerca de 4 a 5 mm de largura e 12 a 15 mm de profundidade. Para tal, recorre-se a uma máquina de corte com disco diamantado e que contém um dispositivo de controlo do alinhamento e da profundidade do entalhe (Figura 3.3-b). No momento em que se está a proceder à abertura dos entalhes é fundamental garantir que não se provoquem danos nas armaduras existentes (longitudinais e transversais) que eventualmente estejam a ser atravessadas pelo entalhe. Refira-se que numa aplicação em obra, se tal acontecer, é imperioso a divulgação de tal facto de forma a serem tomadas medidas de correcção desta incidência. Neste âmbito, é essencial que nos desenhos de execução do reforço de CFRP, segundo a técnica NSM, apareça de uma forma clara, quer a altura que o entalhe deve ter como a localização das armaduras existentes, e que no momento da execução dos entalhes se tenha em consideração eventuais desvios entre o que está no projecto de estabilidade (betão armado) e o que foi executado em obra. Tudo isto justifica a necessidade de uma verificação “in situ”, previamente à elaboração do projecto do reforço de CFRP, da localização das armaduras e da espessura do betão de recobrimento.
- De forma a proporcionar a melhor aderência possível na ligação betão-adesivo, deve ser garantido que a superfície de betão na zona dos entalhes esteja seca, isenta de gorduras e que não apresente partículas soltas. Assim, deve-se proceder à limpeza dos entalhes com a aplicação de ar comprimido (Figura 3.3-c) e, previamente à aplicação do reforço, verificar se o betão se encontra seco;
- Os laminados de CFRP, fornecidos em rolo, já com a secção transversal definitiva (Figura 2.4), são cortados transversalmente ao eixo das fibras com o comprimento desejado (Figura 3.3-d). Posteriormente, de forma a proporcionar as melhores condições de aderência, entre o adesivo e o CFRP, as sujidades que eventualmente os laminados contenham (pó, gorduras, etc) devem ser removidas por intermédio da limpeza dos laminados com acetona (Figura 3.3-e). Um aspecto importante associado aos laminados é a necessidade, previamente à aplicação do reforço, da realização de ensaios para garantir que os valores das propriedades do material aplicado satisfazem os requisitos considerados na fase de projecto. O mesmo tipo de controlo deve ser feito nos restantes materiais intervenientes no reforço.

- Após a colocação, junto do elemento estrutural a reforçar, do número exacto de laminados a aplicar - controlo do número de laminados para não existir qualquer possibilidade de esquecimento de inserção de um CFRP - (Figura 3.3-f), o adesivo epoxídico é produzido segundo as recomendações do fabricante, quer em termos das dosagens das suas duas componentes (a resina - componente A e o endurecedor - componente B), no modo e tempo de mistura e no tempo prático de utilização (“pot-life”) do adesivo (Figura 3.3-g). Refira-se como boa prática a utilização do adesivo associado ao sistema de laminado adoptado.
- Os entalhes são preenchidos com o adesivo (Figura 3.3-h);
- O adesivo é aplicado nas faces dos laminados (Figura 3.3-i);
- Os laminados são introduzidos nos entalhes (Figura 3.3-j) retirando-se, posteriormente, o adesivo em excesso (Figura 3.3-k). Nesta fase deve existir sempre a preocupação de evitar o aparecimento de bolhas de ar que comprometam as condições da ligação betão-adesivo-CFRP.

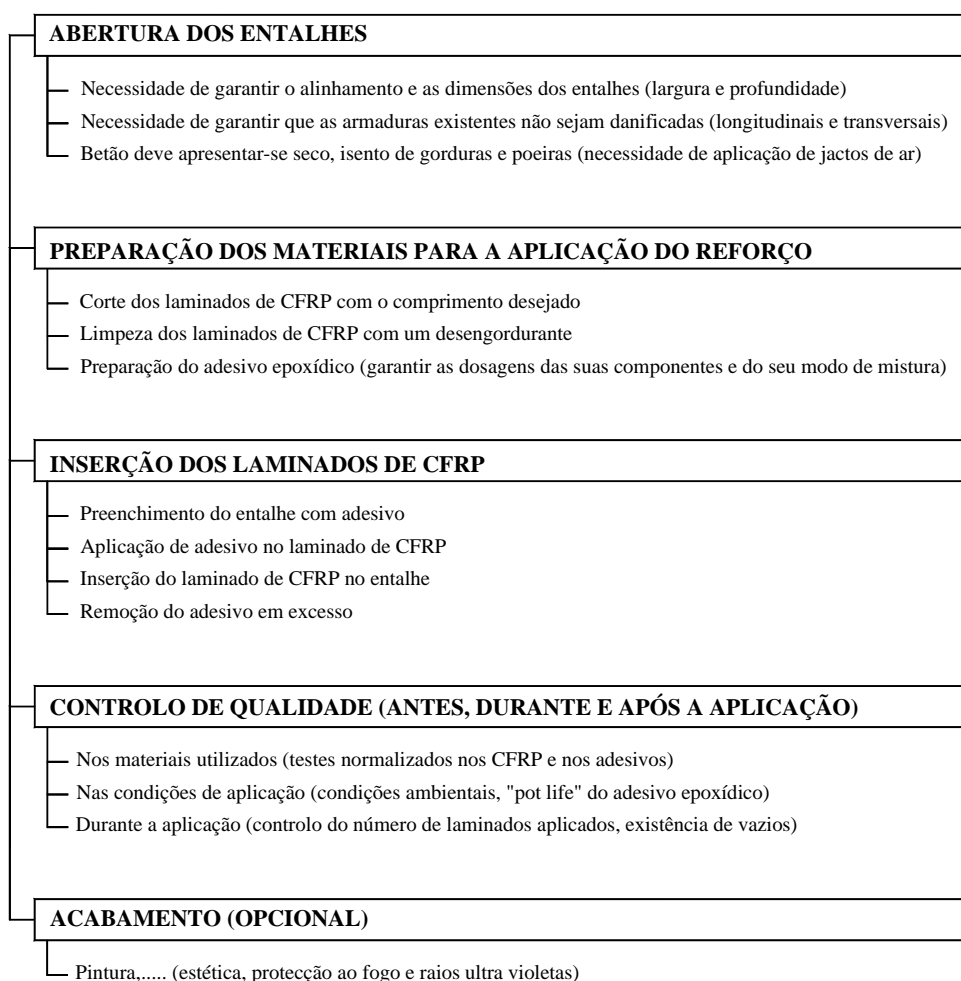


Figura 3.2 - Procedimentos de controlo de qualidade da aplicação de um reforço de CFRP utilizando a técnica NSM com laminados de CFRP.






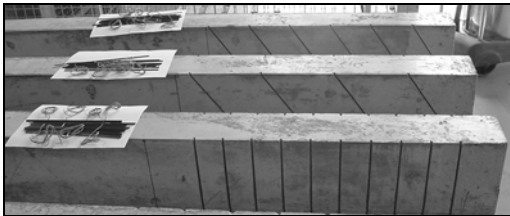





			
a) Marcação da posição dos entalhes	b) Abertura dos entalhes	c) Limpeza dos entalhes	d) Corte dos laminados
			
e) Limpeza dos laminados	f) Laminados a aplicar em cada viga		g) Produção do adesivo
			
h) Adesivo no entalhe	i) Adesivo no laminado	j) Inserção do laminado	k) Remoção do adesivo em excesso

Figura 3.3 - Sequência da aplicação de uma intervenção de reforço ao corte com laminados de CFRP usando a técnica NSM.

3.2 - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA TÉCNICA DE REFORÇO PROPOSTA

De acordo com o que foi referido no início do presente capítulo, a validação experimental da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado foi feita por intermédio da realização de um programa de ensaios experimentais que será objecto de análise nas secções seguintes.

3.2.1 - Concepção dos modelos

O programa de ensaios experimentais foi constituído por quatro séries de vigas de betão armado (séries A10, A12, B10 e B12) representadas na Figura 3.4. As vigas das séries A10 e A12 tinham uma secção transversal de $0.15 \times 0.3 \text{ m}^2$, comprimento de 1.6 m e vão de 1.5 m. As vigas das séries B10 e B12 tinham secção transversal de $0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$, comprimento de 1.0 m e vão de 0.9 m. Todas as vigas tinham um vão de corte igual a duas vezes a altura da secção transversal ($a/h = 2$). As vigas das séries A10 e A12 tinham uma relação $a/d = 2.2$ e as vigas das séries B10 e B12 tinham uma relação $a/d = 2.4$. Em termos de armadura longitudinal na face traccionada, as vigas da série A10 e

B10 continham $4\phi 10$ e as vigas da série A12 e B12 continham $4\phi 12$. A percentagem de armadura longitudinal (ρ_{sl}), obtida por intermédio da expressão (2.6), das vigas das séries A10, A12, B10 e B12 era, respectivamente, 0.76%, 1.10%, 1.68% e 2.45%. Em todas as vigas foram utilizados $2\phi 6$ para armadura longitudinal de compressão. O betão de recobrimento tinha espessura de cerca de 15 mm.

Cada uma das quatro séries (A10, A12, B10 e B12) englobou vigas sem qualquer armadura transversal (A10_C, A12_C, B10_C e B12_C), vigas com estribos de aço verticais (A10_S, A12_S, B10_S e B12_S), vigas em que o reforço ao corte foi materializado por intermédio de faixas de manta unidireccional de CFRP coladas externamente em forma de U (A10_M, A12_M, B10_M e B12_M) e vigas reforçadas ao esforço transversal com laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da viga. Para este sistema de reforço foram testadas duas alternativas: laminados dispostos verticalmente (A10_VL, A12_VL, B10_VL e B12_VL) e laminados inclinados a 45° relativamente ao eixo da viga (A10_IL, A12_IL, B10_IL e B12_IL). As vigas reforçadas ao corte com CFRP não continham armaduras transversais de aço.

A solução de estribos de aço verticais foi concretizada com varões nervurados de 6 mm de diâmetro (2 ramos). Em termos de manta de CFRP foi adoptada a solução de faixas discretas em forma de U, com as fibras orientadas a 90° relativamente ao eixo da viga, e com dimensões de 0.167 mm de espessura e 25 mm de largura. Os laminados utilizados tinham uma espessura de 1.4 mm e uma largura de 10 mm.

A quantidade de reforço nos vários sistemas utilizados foi determinada por forma a que o modo de rotura das vigas fosse por corte e para valores de carga semelhantes. A imposição do modo de rotura por corte (carga de rotura por corte inferior à carga de rotura por flexão) permitiu obter as soluções de reforço em termos de estribos de aço. A obtenção da quantidade de CFRP, para cada uma das quatro séries, teve como princípio impor que as vigas com CFRP tivessem uma capacidade máxima de carga semelhante à da viga estribada. Para o caso dos laminados de CFRP (técnica NSM) foi estabelecido que o funcionamento destes seria similar ao dos estribos de aço mas, em vez de se considerar a tensão de cedência da armadura, foi adoptada uma tensão no laminado correspondente a uma extensão de 4‰. Este valor corresponde ao valor máximo recomendado pelo ACI Committee 440 (2002) para a técnica EBR. Para as soluções de reforço com faixas discretas de mantas de CFRP, coladas externamente em forma de U e sem qualquer tipo de fixação nas extremidades, foram consideradas as disposições do ACI Committee 440 (2002). O pré-dimensionamento das soluções de reforço ao corte testadas é descrito pormenorizadamente no anexo A. Na Figura 3.4 e na Tabela 3.1

apresentam-se as principais informações relativas aos modelos ensaiados no presente programa de ensaios. Para a solução de laminados a percentagem de reforço de CFRP foi obtida por:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot a_f \cdot b_f}{b_w \cdot s_f \cdot \sin \theta_f} \times 100 \quad [45^\circ \leq \theta_f \leq 90^\circ] \quad (3.1)$$

em que $a_f = 1.4$ mm e $b_f = 10$ mm são as dimensões da secção transversal do laminado, b_w é a largura da alma da viga, s_f é o espaçamento entre laminados consecutivos e θ_f é a inclinação dos laminados.

Tabela 3.1 - Séries de vigas ensaiadas.

Designação das vigas		Sistema de reforço ao corte em cada viga			
		Material	Quantidade	Percentagem [%]*	Espaçamento [mm] Ângulo [°]
Série A10 ($4\phi 10 - \rho_{sl} = 0.76\%$)	A10_C	-	-	-	-
	A10_S	Estribos de aço	6 $\phi 6$ de dois ramos	0.13	300 90
	A10_M	Mantas de CFRP (EBR)	8 faixas em forma de U (0.167x25 mm ²) - 2 camadas	0.06	190 90
	A10_VL	Laminados de CFRP (NSM)	2x8 laminados (1.4x10 mm ²)	0.09	200 90
	A10_IL	Laminados de CFRP (NSM)	2x6 laminados (1.4x10 mm ²)	0.09	300 45
Série A12 ($4\phi 12 - \rho_{sl} = 1.10\%$)	A12_C	-	-	-	-
	A12_S	Estribos de aço	10 $\phi 6$ de dois ramos	0.25	150 90
	A12_M	Mantas de CFRP (EBR)	14 faixas em forma de U (0.167x25 mm ²) - 2 camadas	0.12	95 90
	A12_VL	Laminados de CFRP (NSM)	2x14 laminados (1.4x10 mm ²)	0.19	100 90
	A12_IL	Laminados de CFRP (NSM)	2x12 laminados (1.4x10 mm ²)	0.18	150 45
Série B10 ($4\phi 10 - \rho_{sl} = 1.68\%$)	B10_C	-	-	-	-
	B10_S	Estribos de aço	6 $\phi 6$ de dois ramos	0.25	150 90
	B10_M	Mantas de CFRP (EBR)	10 faixas em forma de U (0.167x25 mm ²) - 2 camadas	0.14	80 90
	B10_VL	Laminados de CFRP (NSM)	2x8 laminados (1.4x10 mm ²)	0.19	100 90
	B10_IL	Laminados de CFRP (NSM)	2x6 laminados (1.4x10 mm ²)	0.18	150 45
Série B12 ($4\phi 12 - \rho_{sl} = 2.45\%$)	B12_C	-	-	-	-
	B12_S	Estribos de aço	10 $\phi 6$ de dois ramos	0.50	75 90
	B12_M	Mantas de CFRP (EBR)	16 faixas em forma de U (0.167x25 mm ²) - 2 camadas	0.28	40 90
	B12_VL	Laminados de CFRP (NSM)	2x14 laminados (1.4x10 mm ²)	0.37	50 90
	B12_IL	Laminados de CFRP (NSM)	2x12 laminados (1.4x10 mm ²)	0.35	75 45

* A percentagem de estribos foi obtida usando a equação (2.5). A percentagem de mantas de CFRP foi obtida usando a equação

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f}{b_w \cdot s_f \cdot \sin \theta_f} \times 100, \text{ em que } n, t_f \text{ e } w_f \text{ são, respectivamente, o número de camadas, a espessura e a largura das faixas de CFRP.}$$

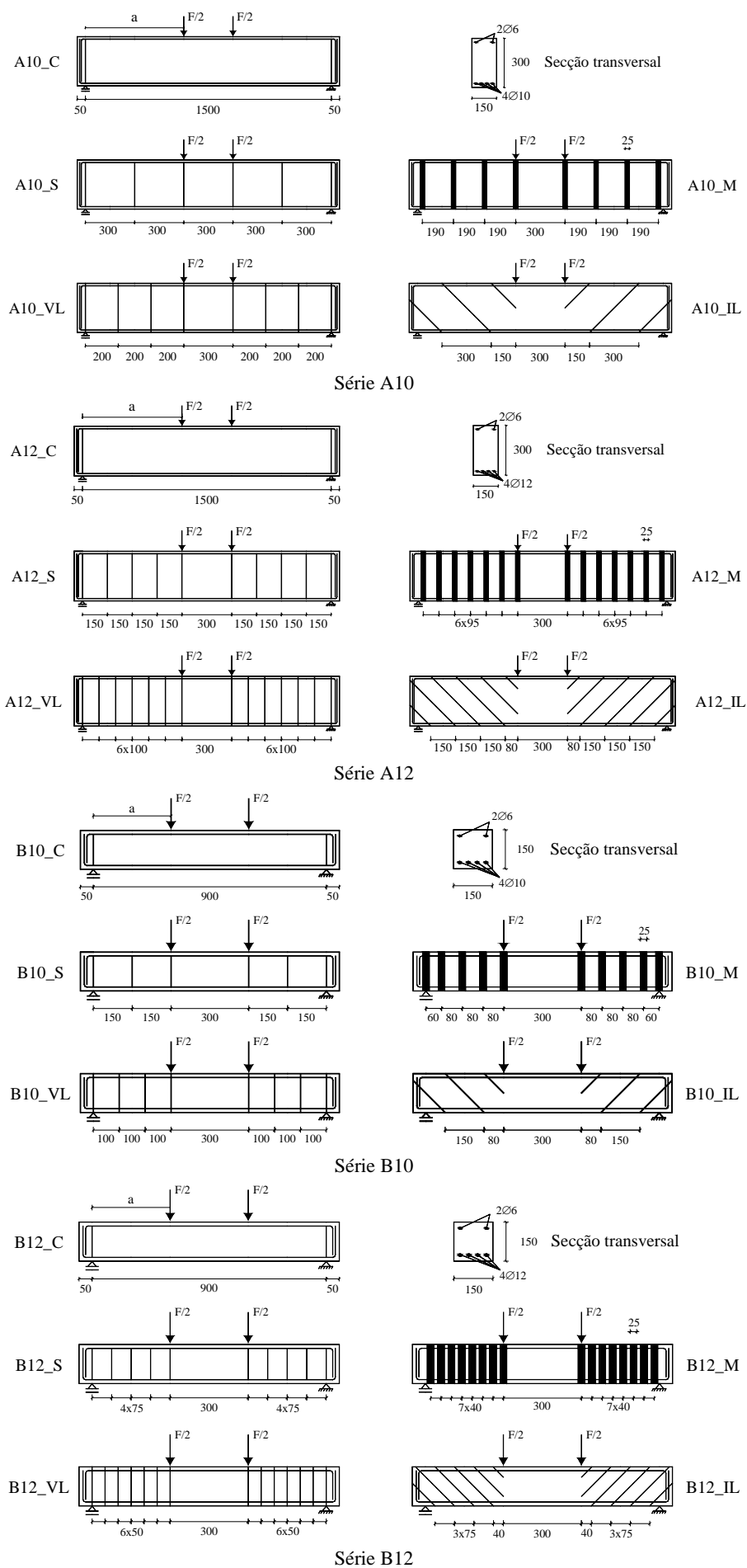
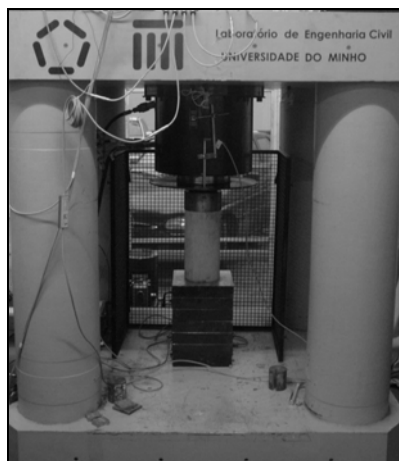


Figura 3.4 - Modelos ensaiados (medidas em mm).

3.2.2 - Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão utilizado na concepção das vigas, cuja composição se encontra registada no anexo B desta dissertação, foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas, a qual corresponde uma idade média de 227 dias na série A e 105 dias na série B. Para tal, de acordo com a EN 206-1 (2000), efectuaram-se ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de três tipos de varões de aço nervurado (varões com diâmetro de 6, 10 e 12 mm), cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial efectuados segundo o estipulado na EN 10002-1 (1990). Na Figura 3.5 apresentam-se fotografias ilustrativas dos ensaios efectuados para a caracterização do betão e do aço das armaduras. Na Tabela 3.2 estão registados os valores médios das propriedades mecânicas mais significativas, obtidas experimentalmente, do betão e dos aços utilizados. No anexo B estão compilados os valores obtidos nos ensaios realizados nos vários provetes para caracterizar o betão e o aço das armaduras.



a) Ensaio de compressão uniaxial de um cilindro (betão)



b) Ensaio de tracção uniaxial (aço)

Figura 3.5 - Ensaios para caracterização do betão e das armaduras de aço.

Tabela 3.2 - Principais propriedades do betão e do aço.

	Vigas		Resistência à compressão			
Betão	Série A	$f_{cm} = 37.6$ MPa (aos 28 dias)	$f_{cm} = 49.2$ MPa (aos 227 dias - idade à data do ensaio das vigas)			
	Série B	$f_{cm} = 49.5$ MPa (aos 28 dias)	$f_{cm} = 56.2$ MPa (aos 105 dias - idade à data do ensaio das vigas)			
	Vigas	Resistência à tracção	φ6 (longitudinal)	φ6 (transversal)	φ10	φ12
Aço	Série A	f_{sym}^*	622 MPa	540 MPa	464 MPa	574 MPa
		f_{sum}^{**}	702 MPa	694 MPa	581 MPa	672 MPa
	Série B	f_{sym}^*	618 MPa	540 MPa	464 MPa	571 MPa
		f_{sum}^{**}	691 MPa	694 MPa	581 MPa	673 MPa

* Valor médio da tensão de cedência; ** Valor médio da tensão máxima.

No presente programa de ensaios foram utilizados dois sistemas compósitos de CFRP unidireccionais, a manta flexível *curada “in situ”* e o laminado semi-rígido *pré-fabricado*. As características dos materiais constituintes dos sistemas de reforço adoptados, que se encontram resumidas na Tabela 3.3, foram obtidas das fichas técnicas disponibilizadas pelo fornecedor (Bettor MBT Portugal, 1999).

Para o laminado de CFRP apresentam-se na Tabela 3.3, além dos valores fornecidos pelo fabricante, os valores médios das suas propriedades obtidos por intermédio da realização de ensaios de tracção uniaxial de seis provetes (Figura 3.6), segundo a ISO 527-5 (1997). Nas fotografias da Figura 3.7 apresenta-se o ensaio de tracção uniaxial de um provete de laminado de CFRP e o modo de rotura típico ocorrido. O comportamento do laminado de CFRP, quando submetido a um ensaio de tracção uniaxial, está ilustrado pelo diagrama tensão vs extensão apresentado na Figura 3.7, onde é possível verificar o comportamento linear até à rotura deste tipo de material. Todos os valores obtidos na caracterização experimental dos laminados de CFRP estão registados no anexo B.

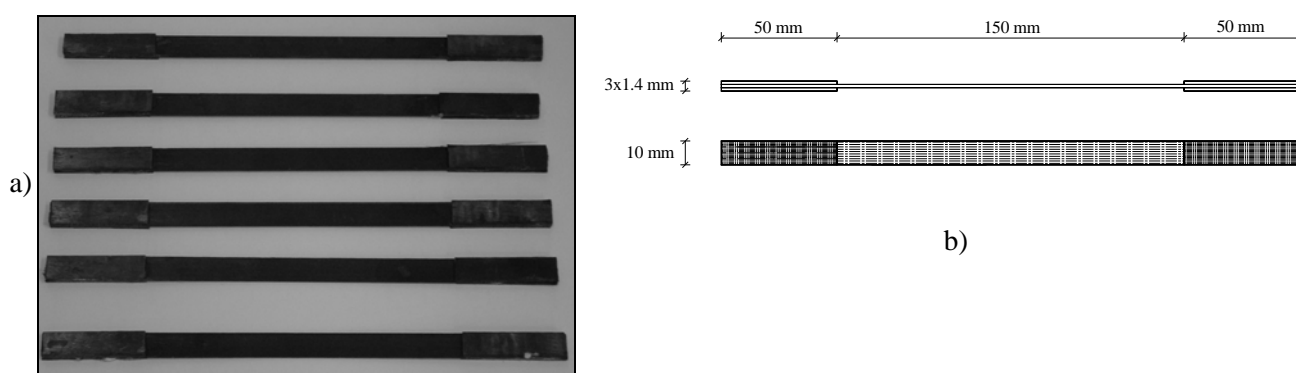


Figura 3.6 - Provetes de laminados de CFRP ensaiados (a) e dimensões do provete (b).

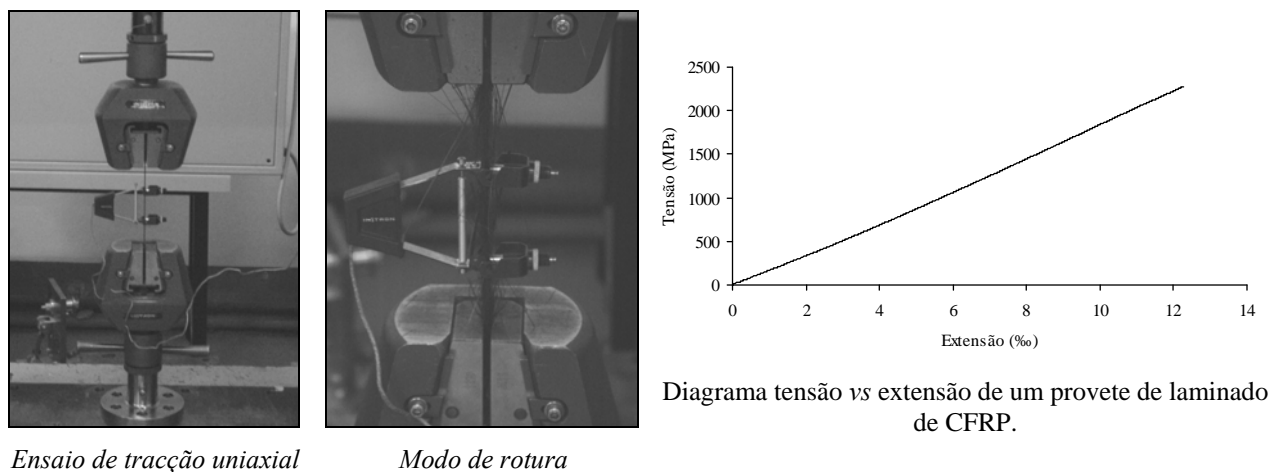


Figura 3.7 - Ensaio de tracção uniaxial de um provete de laminado de CFRP: modo de rotura e diagrama tensão vs extensão.

Tabela 3.3 - Principais propriedades dos constituintes dos sistemas de CFRP.

Sistema de CFRP			Principais propriedades			
Tipo	Material		Resistência à tração [MPa]		Módulo de Elasticidade [GPa]	Extensão última [%]
	Tipo	Designação				
Manta curada "in situ"	Primário	MBrace Primário	12	0.7	3.0	–
	Resina	MBrace Saturante	54	3	2.5	–
	Manta	MBrace Manta C5-30	3000	390	0.8	0.167
Laminado pré-fabricado	Adesivo	MBrace Adesivo	-	7	–	–
	Laminado	MBrace Laminado LM	(i) 2200	150	1.4	1.4
			(ii) 2286	166	1.3	

(i) De acordo com o fabricante; (ii) Valores experimentais obtidos no âmbito do presente trabalho.

3.2.3 - Aplicação do reforço de CFRP

A colagem externa de mantas de CFRP envolveu o tratamento da superfície de betão, de forma a garantir que a base tivesse boas condições de aderência, e a colagem propriamente dita do reforço. O tratamento da superfície de betão consistiu na passagem de um esmeril nas zonas de colagem do CFRP com o objectivo de remover a camada superficial. No intuito de evitar concentração de tensões que pudessem provocar uma rotura prematura do reforço procedeu-se ao arredondamento das arestas nas zonas onde estava prevista a colagem dos reforços. Posteriormente, aplicaram-se jactos de ar a fim de eliminar as sujidades remanescentes. Após verificar que a superfície de betão a reforçar não se apresentava degradada nem delaminada (caso contrário seria necessário aplicar o "putty"), uma camada de primário foi aplicada em toda a extensão da zona de reforço, de forma a garantir a melhor aderência possível da manta à base.

Após o corte das faixas de manta com as dimensões desejadas (em termos de largura - corte na direcção das fibras - e em termos de comprimento - corte na direcção transversal às fibras), procedeu-se à colagem do CFRP recorrendo a uma resina epoxídica. Durante a aplicação do reforço houve a preocupação em garantir: o alinhamento das fibras na direcção desejada, a não formação de bolhas de ar e a não existência de resina em excesso. Na Figura 3.8 apresentam-se, sequencialmente, as fases mais significativas do processo de aplicação do reforço ao corte de vigas de betão armado por meio da colagem externa de faixas discretas de manta de CFRP em forma de U.


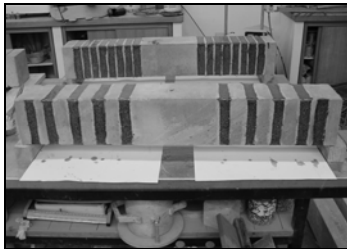

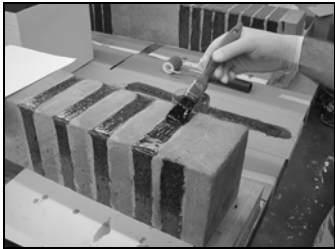
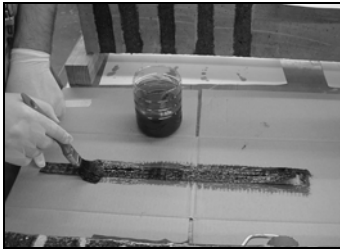

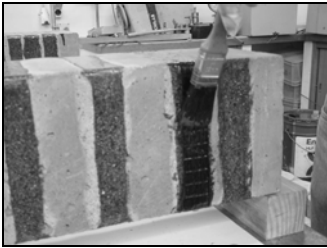
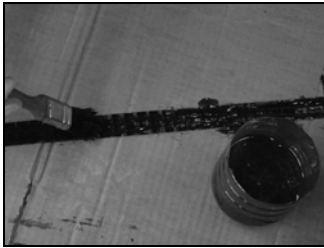

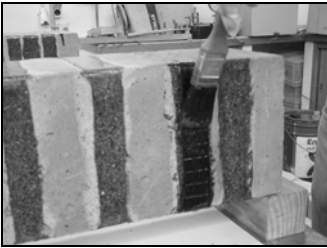
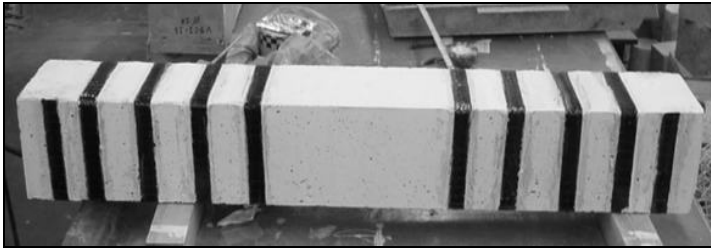
		
Preparação da superfície: esmerilagem	Após a aplicação do primário	Obtenção das faixas de manta com 25 mm de largura - corte na direcção das fibras
		
Aplicação da 1ª camada de resina no betão	Aplicação de resina na 1ª camada de manta	Colagem da 1ª camada de manta - Alinhamento das fibras
		
Aplicação de resina sobre a 1ª camada de manta	Aplicação de resina na 2ª camada de manta	Colagem da 2ª camada de manta
		
Aplicação de resina sobre a 2ª camada de manta	Aspecto final da viga após a execução do reforço (face traccionada virada para cima)	

Figura 3.8 - Fases da aplicação do reforço ao corte com faixas discretas de duas camadas de manta de CFRP unidireccional coladas externamente.

Na Figura 3.9 encontram-se ilustradas as principais fases do processo de aplicação do reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. Esta intervenção de reforço usando a técnica NSM com laminados de CFRP levou em consideração o conjunto de procedimentos e princípios que foram referidos na secção 3.1.

A aplicação do reforço ao corte com CFRP usando a técnica EBR (Figura 3.8) e a técnica NSM (Figura 3.9) permitiu comprovar a maior simplicidade e rapidez de execução da técnica da inserção NSM.








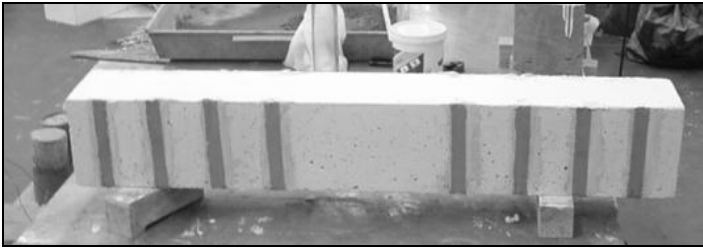
		
Abertura dos entalhes	Corte dos laminados com o comprimento desejado	Limpeza do laminado de CFRP
		
Preenchimento do entalhe com o adesivo	Aplicação do adesivo no laminado de CFRP	Inserção do laminado de CFRP no entalhe
		
Remoção do adesivo em excesso e execução do acabamento final	Aspecto final da viga após a execução do reforço	

Figura 3.9 - Fases da aplicação do reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento.

3.2.4 - Sistema de ensaio

As vigas foram submetidas a ensaios à flexão em quatro pontos de carga até à sua rotura. Nas Figuras 3.10 e 3.11 apresenta-se o esquema do ensaio das vigas das séries A e B, respectivamente. Para instrumentação recorreu-se a uma célula de carga com uma capacidade máxima de carga de 300 kN e a cinco transdutores de deslocamentos (LVDT's) de 25 mm e 50 mm de campo de medida, colocados a meio vão, no alinhamento dos pontos de carga e a meio dos vãos de corte. Os LVDT's ficaram suportados num sistema que evita o registo de deslocamentos parasitas ("Japanese Yoke"), tal como representado nas Figuras 3.10 e 3.11. Os ensaios foram controlados por intermédio do LVDT colocado a meio vão (control), tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento constante de 0.01 mm/s (ensaio com controlo de deslocamentos).

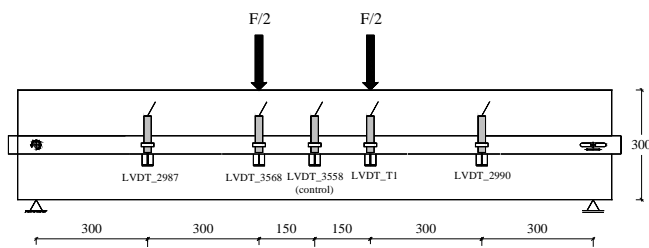
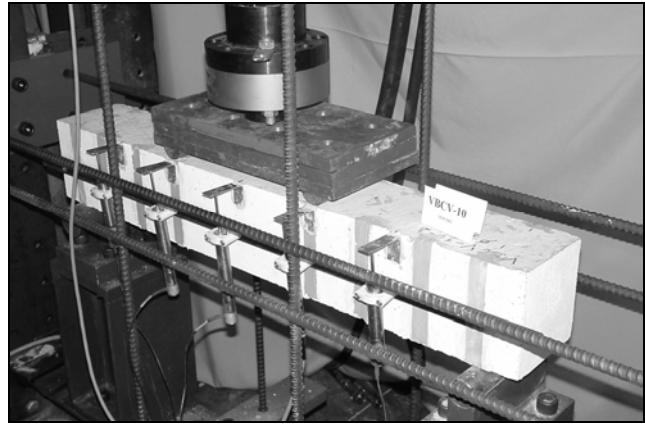
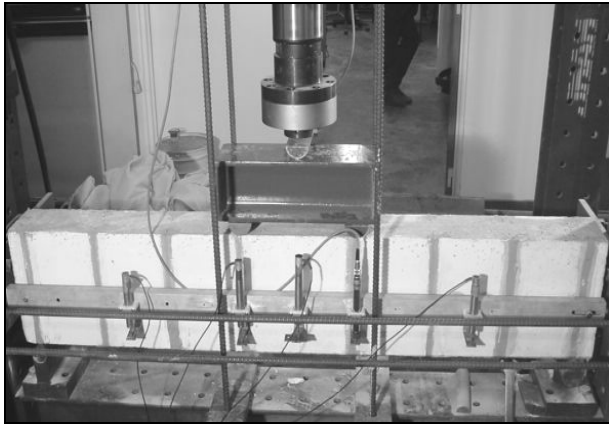


Figura 3.10 - Esquema geral do ensaio das vigas da série A (dimensões em mm).

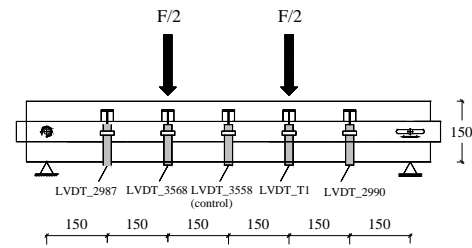


Figura 3.11 - Esquema geral do ensaio das vigas da série B (dimensões em mm).

3.2.5 - Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos no programa de ensaios realizado serão apresentados e discutidos de forma a focar os seguintes aspectos: eficácia do reforço de CFRP em termos de capacidade de carga; eficácia do reforço de CFRP em termos de capacidade deformacional na rotura; comportamento das vigas reforçadas ao longo do carregamento e respectivos modos de rotura; desempenho dos sistemas de reforço ao corte utilizados.

Definindo F_{max,K_C} e F_{max,K_S} como a força máxima registada na viga sem qualquer reforço ao corte e na viga estribada (K representa a série de vigas), respectivamente, foram fixados como indicadores da eficácia das técnicas de reforço ao corte adoptadas, em termos de aumento da capacidade máxima de carga, os parâmetros $F_{max,K}/F_{max,K_C}$ e $F_{max,K}/F_{max,K_S}$. De forma a avaliar a eficiência de cada uma das soluções de reforço ao corte testadas, no que diz respeito à capacidade deformacional e ao nível de retenção de capacidade de carga na fase pós pico, foi calculado o valor do deslocamento $\delta_{p,K}$ (Figura 3.12) correspondente a $0.95F_{max,K}$ após $\delta_{F_{max,K}}$. Este nível de deformação foi adoptado pois representa a capacidade deformacional para uma pequena perda da capacidade de carga (somente 5%) na fase pós pico (pós $F_{max,K}$). O nível de capacidade deformacional das vigas reforçadas foi avaliado por intermédio dos parâmetros $\delta_{p,K}/\delta_{p,K_C}$ e $\delta_{p,K}/\delta_{p,K_S}$ onde δ_{p,K_C} e δ_{p,K_S} são as flechas para $0.95F_{max,K_C}$ e $0.95F_{max,K_S}$, respectivamente.

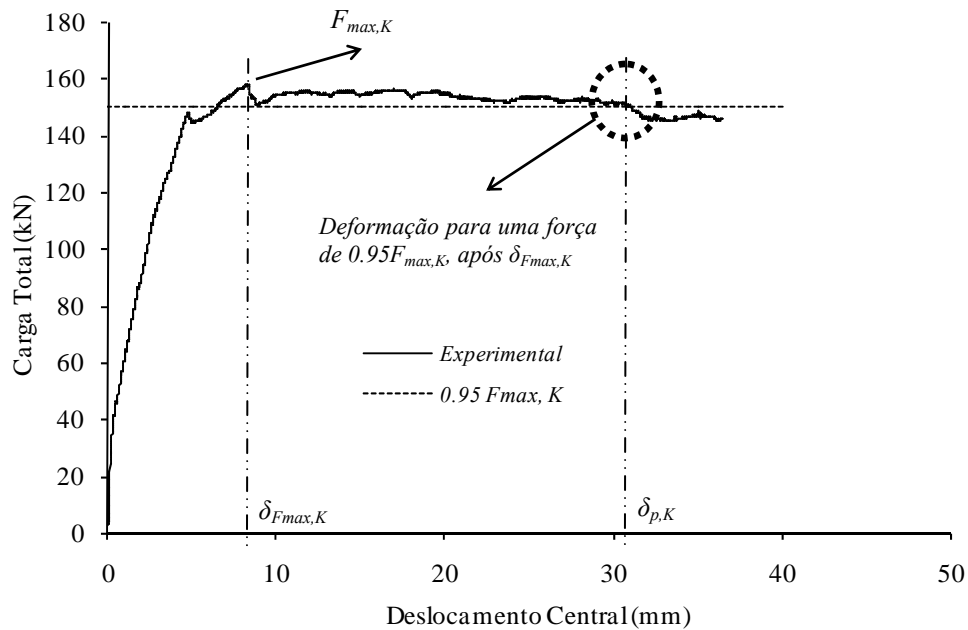


Figura 3.12 - Definição de $\delta_{p,K}$: deslocamento para uma carga de $0.95F_{max,K}$ após $\delta_{Fmax,K}$.

3.2.5.1 - Vigas da série A com 4 ϕ 10 longitudinais

Na Figura 3.13 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento central das vigas A10_C, A10_S, A10_M, A10_VL e A10_IL. Na Tabela 3.4 apresentam-se, para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores obtidos para F_{max} e δ_p . Além disso, apresentam-se os indicadores da eficácia das técnicas de reforço ao corte adoptadas em termos de aumento da capacidade máxima de carga e de deformação na rotura das vigas.

Da análise da Figura 3.13 e dos resultados apresentados na Tabela 3.4 verifica-se que a adopção dos compósitos de CFRP (mantas e laminados), como solução de reforço ao corte, proporcionou aumentos de capacidade de carga e de capacidade deformacional. Tendo por base a força máxima registada na viga A10_C ($F_{max,A10_C}$) constata-se que os sistemas de CFRP adoptados garantiram aumentos de F_{max} entre os 22% e os 58%. O menor destes valores ocorreu na viga com faixas de manta (A10_M) e o maior foi alcançado pelas vigas com laminados inseridos (A10_VL e A10_IL). A força máxima registada nas vigas A10_M, A10_VL e A10_IL (vigas reforçadas com compósitos de CFRP) foi, respectivamente, 28%, 6% e 7% inferior à força máxima da viga com estribos de aço (A10_S).

De acordo com as curvas de comportamento apresentadas na Figura 3.13 é possível verificar que os reforços ao corte foram activados para valores de carga semelhantes ao da carga máxima da viga A10_C (sem qualquer reforço ao corte), ou seja, a partir do momento em que se forma a fenda diagonal de corte (até ao referido nível de carga as curvas de comportamento das cinco vigas são

semelhantes). Esta constatação foi verificada, conforme se verá mais adiante nas outras séries de vigas testadas (ver Figura 3.18, Figura 3.22 e Figura 3.24). Além do facto referido, a análise da Figura 3.13 permite verificar que das soluções de reforço ao corte testadas, a única que não conduziu à cedência das armaduras longitudinais foi a da viga A10_M (mantas de CFRP coladas externamente).

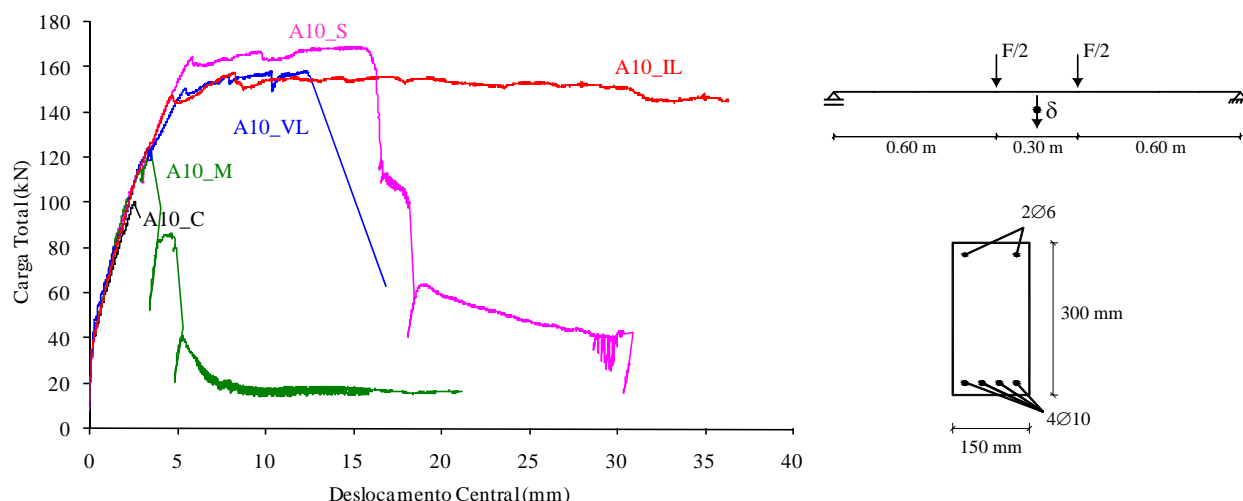


Figura 3.13 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série A (4Ø10 longitudinais).

Tabela 3.4 - Comparação do comportamento último das vigas da série A com 4Ø10.

Vigas	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, A10_C}$	$F_{max}/F_{max, A10_S}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_{p,A10_C}$	$\delta_p/\delta_{p,A10_S}$
A10_C	100.40	1.00	0.59	2.80	1.00	0.17
A10_S	169.35	1.69	1.00	16.25	5.80	1.00
A10_M	122.06	1.22	0.72	3.75	1.34	0.23
A10_VL	158.64	1.58	0.94	12.86	4.59	0.79
A10_IL	157.90	1.57	0.93	30.96	11.06	1.91

O melhor desempenho em termos de capacidade deformacional da viga na sua rotura foi alcançado pela solução de laminados aplicados com uma inclinação de 45°. Em comparação com o deslocamento δ_p verificado na viga A10_C ($\delta_{p,A10_C}$), o deslocamento $\delta_{p,A10_S}$, $\delta_{p,A10_M}$, $\delta_{p,A10_VL}$ e $\delta_{p,A10_IL}$ foi, respectivamente, 480%, 34%, 359% e 1006% superior. Assim, a viga reforçada com laminados inclinados a 45° introduziu um acréscimo de capacidade deformacional 91% superior ao acréscimo proporcionado pela viga estribada. Por outro lado, a capacidade deformacional da viga A10_M foi 23% da verificada na viga A10_S. Nas vigas reforçadas com laminados inseridos, carga residual de valor próximo da correspondente carga máxima foi mantida até flechas elevadas,

principalmente na viga A10_IL, o que não aconteceu na viga reforçada com faixas de manta (Figura 3.13).

Na Figura 3.14 apresentam-se os modos de ruína verificados nas cinco vigas ensaiadas. A rotura da viga A10_C esteve associada à ocorrência de uma fenda de corte, após se ter desenvolvido um pequeno número de fendas de flexão. Na viga estribada (A10_S), após o desenvolvimento de fendas de flexão (em maior número que no caso anterior) surgiram fendas de corte em cada um dos vãos de corte. A rotura acabou por ocorrer por abertura excessiva de uma dessas fendas, onde se deu a rotura do estribo aí localizado. O aumento da abertura da fenda de rotura de corte foi acompanhado pelo fecho das restantes fendas. A viga reforçada com faixas de manta (A10_M) atingiu a rotura com o destacamento da manta atravessada pela fenda diagonal de corte, logo após a formação desta fenda (Figura 3.15). O processo de destacamento do CFRP, devido à configuração de reforço em forma de U, iniciou-se na parte superior da viga (menor comprimento de ancoragem do CFRP face à fenda de corte). De seguida, deu-se a rotura da manta (Figura 3.15) atravessada pelo patamar horizontal da fenda de rotura de corte (abertura excessiva da fenda de corte originou um gradiente elevado de tensões de corte e tracção no CFRP). As vigas reforçadas com laminados inseridos no betão de recobrimento apresentaram modos de rotura menos frágeis que o verificado na viga A10_M (manta), principalmente a viga A10_IL, cuja rotura foi por flexão (Figura 3.16). A carga máxima da viga A10_VL foi atingida imediatamente antes de ocorrer a cedência da parte superior do laminado (menor comprimento de aderência do laminado) atravessado pela fenda de rotura de corte, quando esta apresentava uma abertura significativa (Figura 3.17).

A análise da Figura 3.14 permite verificar que o padrão de fendilhação das vigas com laminados foi tão ou mais extensivo que o da viga estribada. Este facto não ocorreu na viga reforçada com mantas de CFRP, onde o aparecimento de uma fenda diagonal de corte acabou por inviabilizar o surgimento de mais fendas, assim como, o desenvolvimento das fendas de flexão já existentes. Deste modo, verifica-se que as mantas coladas externamente não foram tão eficazes quanto os laminados inseridos no que diz respeito a evitar a propagação da fenda de rotura de corte.

O padrão de fendilhação que se registou nas vigas com laminados inseridos permite justificar o melhor desempenho da viga A10_IL (laminados aplicados a 45°) em relação ao da viga A10_VL (laminados verticais) em termos de capacidade deformacional e no modo de rotura (na solução de laminados inclinados ocorreu rotura por flexão). Com efeito, verifica-se que na viga A10_VL o número de laminados atravessados pela fenda de rotura de corte é inferior ao que se verificou na viga A10_IL. Além disso, as fendas de corte apresentam uma inclinação, relativamente ao eixo da viga, de aproximadamente 45°, ou seja, existe uma ortogonalidade entre a fenda de corte e o laminado

colocado a 45° que potencia o desempenho do CFRP (na solução de laminados verticais a referida ortogonalidade não existe). A existência de um maior número de elementos resistentes ao esforço transversal e o facto da orientação da fenda de corte otimizar as potencialidades do reforço de CFRP não proporcionaram a ocorrência de uma carga máxima na viga A10_IL de valor superior à registada na viga A10_VL pela circunstância das armaduras longitudinais terem entrado em cedência.

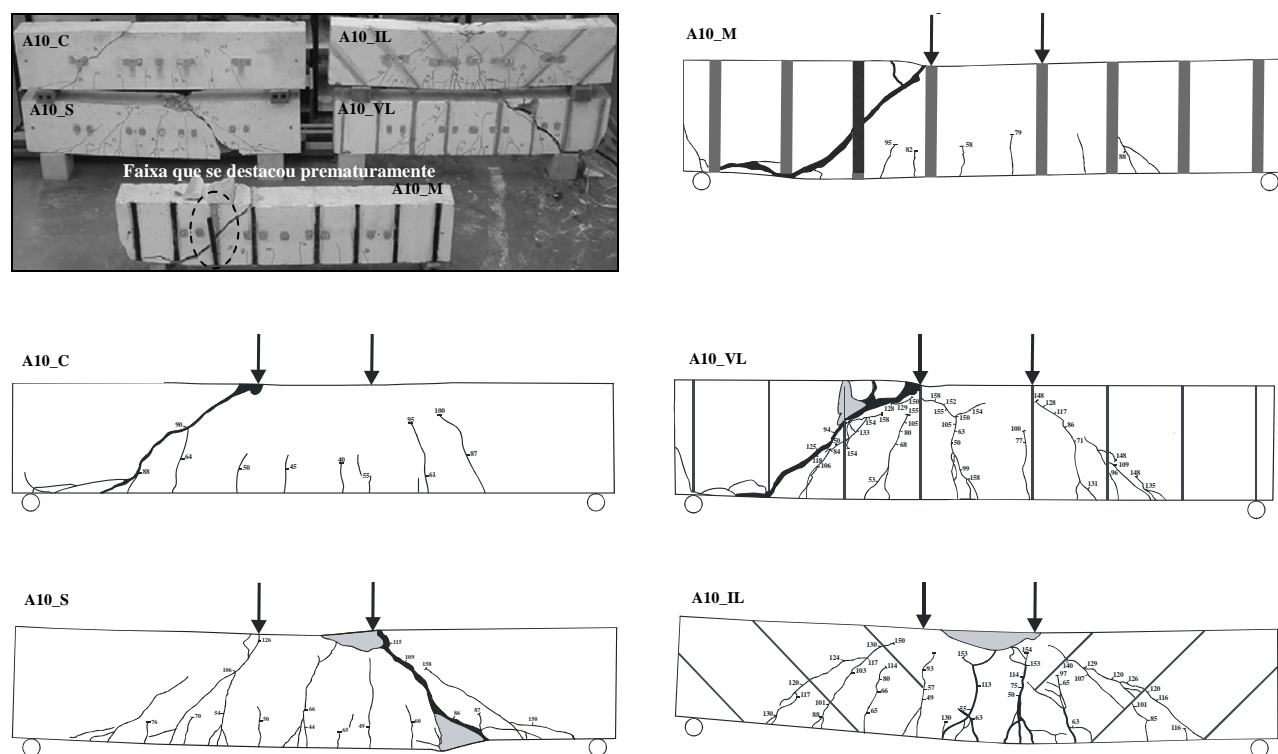


Figura 3.14 - Modos de rotura verificados nas vigas da série A com $4\phi 10$ longitudinais.

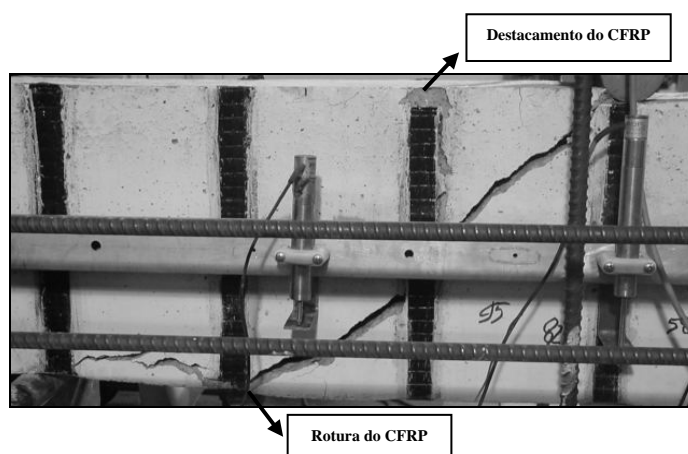
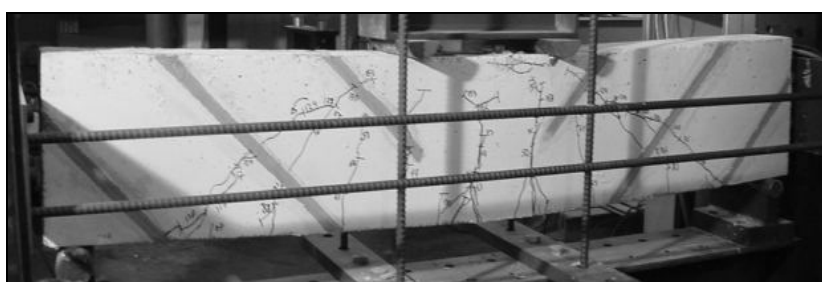


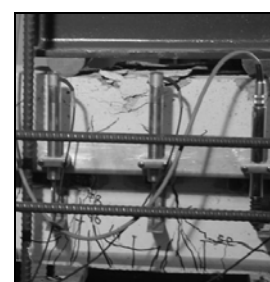
Figura 3.15 - Pormenor da zona de rotura da viga A10_M.



Padrão de fendilhação instalado para uma carga de 140 kN (carga máxima = 157.9 kN).

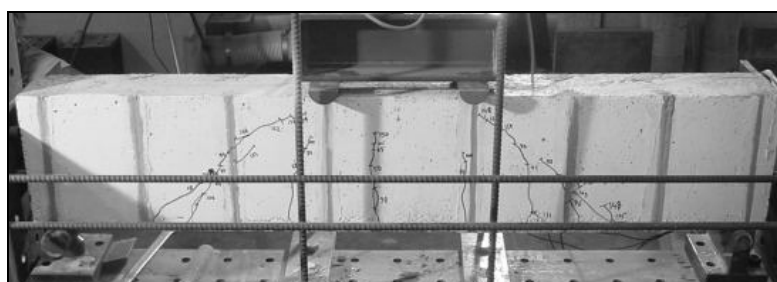


Padrão de fendilhação instalado para uma carga de 154 kN (carga máxima = 157.9 kN).

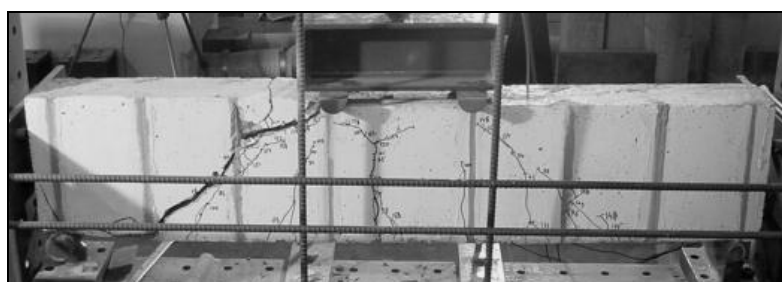


Pormenor do esmagamento do betão.

Figura 3.16 - Fases do ensaio da viga A10_IL.



Padrão de fendilhação instalado para uma carga próxima da máxima.



Padrão de fendilhação instalado na rotura.



Cedência do laminado.

Figura 3.17 - Fases do ensaio da viga A10_VL.

3.2.5.2 - Vigas da série A com 4 ϕ 12 longitudinais

Na Figura 3.18 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento central das vigas A12_C, A12_S, A12_M, A12_VL e A12_IL. Na Tabela 3.5 apresentam-se, para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores obtidos para F_{max} e δ_p . Além disso, apresentam-se os indicadores da eficácia das técnicas de reforço ao corte adoptadas em termos de aumento da capacidade máxima de carga e de deformação na rotura das vigas.

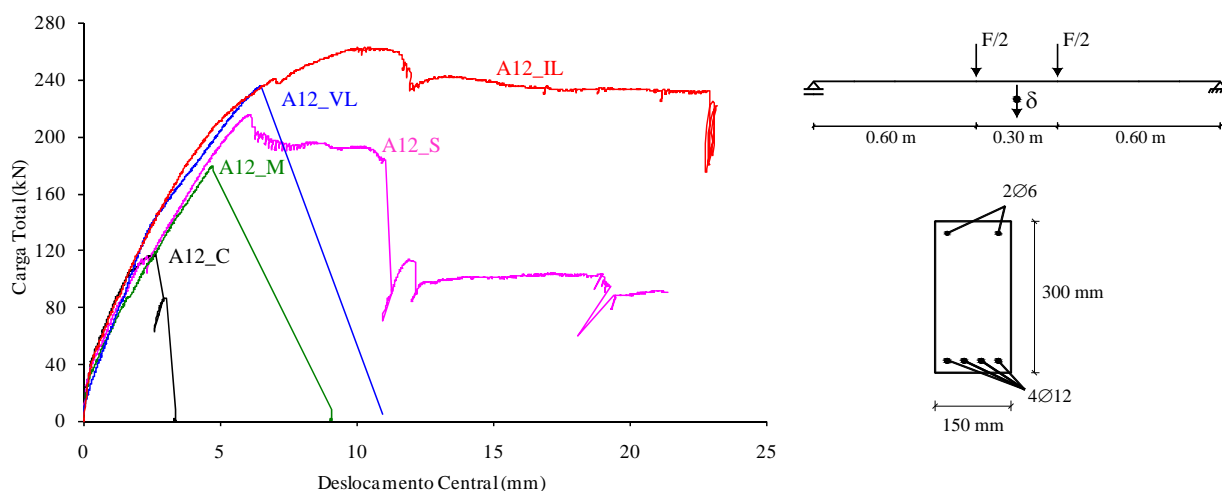


Figura 3.18 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série A (4 ϕ 12 longitudinais).

Tabela 3.5 - Comparação do comportamento último das vigas da série A com 4 ϕ 12.

Vigas	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, A12_C}$	$F_{max}/F_{max, A12_S}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_{p, A12_C}$	$\delta_p/\delta_{p, A12_S}$
A12_C	116.50	1.00	0.54	2.74	1.00	0.43
A12_S	215.04	1.85	1.00	6.34	2.31	1.00
A12_M	179.54	1.54	0.83	4.91	1.79	0.77
A12_VL	235.11	2.02	1.09	6.70	2.45	1.06
A12_IL	262.38	2.25	1.22	11.75	4.29	1.85

Da análise da Figura 3.18 e dos resultados apresentados na Tabela 3.5 verifica-se que a adopção dos compósitos de CFRP (mantas e laminados), como solução de reforço ao corte, proporcionou aumentos de capacidade de carga e de capacidade deformacional. Tendo por base os resultados da viga A12_C constata-se que, em termos da força F_{max} , os estribos colocados na viga A12_S permitiram um aumento de 85%, enquanto os CFRP garantiram incrementos de 54% a 125%, sendo o maior valor o registado na viga com laminados inclinados (A12_IL) e o menor na viga com faixas de manta (A12_M). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com CFRP com a observada na viga A12_S (com estribos) verifica-se que na viga A12_M alcançou-se um valor 17% inferior, na viga A12_VL atingiu-se um valor 9% superior e na viga A12_IL registou-se um valor 22% superior. Nas vigas A12_IL e A12_S ocorreu a cedência das armaduras longitudinais.

O melhor desempenho dos laminados aplicados a 45° também foi notório em termos de capacidade deformacional da viga na sua rotura. Quando comparado com o deslocamento δ_p da viga A12_C ($\delta_{p, A12_C}$), o deslocamento δ_p registado das vigas A12_S, A12_M, A12_VL e A12_IL foi, respectivamente, 131%, 79%, 145% e 329% superior, isto é, a viga reforçada com laminados

inclinados a 45° proporcionou um acréscimo de capacidade deformacional 85% superior ao acréscimo proporcionado pela viga estribada. A capacidade deformacional da viga A12_M foi 77% da verificada na viga A12_S.

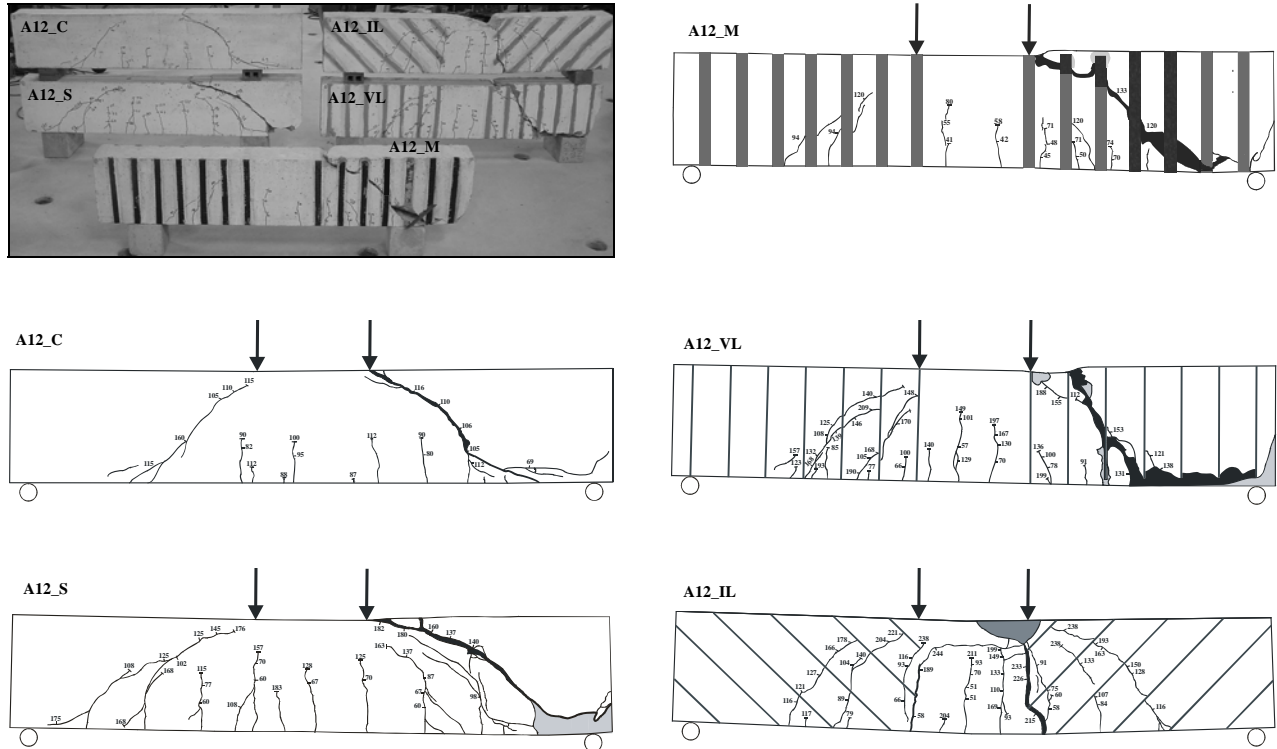


Figura 3.19 - Modos de rotura verificados nas vigas da série A com $4\phi 12$ longitudinais.

Na Figura 3.19 apresentam-se os modos de rotura verificados nas cinco vigas ensaiadas. As primeiras fendas que surgiram na viga A12_C foram de flexão. O aumento do carregamento provocou o aparecimento de duas fendas de corte (uma em cada vão de corte). A rotura da viga ocorreu pela abertura excessiva de uma dessas fendas. Na viga estribada (A12_S), após o desenvolvimento de fendas de flexão (em maior número que no caso anterior) surgiram fendas de corte em cada um dos vãos de corte. A rotura acabou por ocorrer por abertura excessiva de uma dessas fendas, onde se deu a rotura de um dos estribos aí localizados. Em ambas as vigas, o aumento da abertura da fenda de corte foi acompanhado pelo fecho das restantes fendas. O modo de rotura da viga com faixas de manta (A12_M) foi semelhante ao da viga A10_M, variando apenas o número de faixas de manta atravessados pela fenda de rotura de corte (Figura 3.20). As vigas reforçadas com laminados inseridos no betão de recobrimento apresentaram modos de rotura menos frágeis que o verificado na viga A12_M (manta), especialmente a viga A12_IL, cuja rotura foi por flexão (Figura 3.21). A carga máxima da viga A12_VL foi atingida imediatamente antes de ocorrer a cedência da parte inferior do laminado (menor comprimento de aderência do laminado) atravessado pela fenda de rotura de corte (Figura 3.20). Na Figura 3.19 verifica-se que o padrão de fendilhagem das vigas com laminados foi

tão ou mais difuso que o da viga estribada. Este facto não ocorreu na viga com mantas de CFRP, resultando consequências similares já descritas na análise anteriormente feita ao comportamento da viga A10_M. O melhor desempenho da solução de laminados a 45° (viga A12_IL) em relação à solução de laminados verticais (viga A12_VL) deve-se às mesmas circunstâncias que foram referidas quando se comparou o padrão de fendilhação das vigas A10_IL e A10_VL.

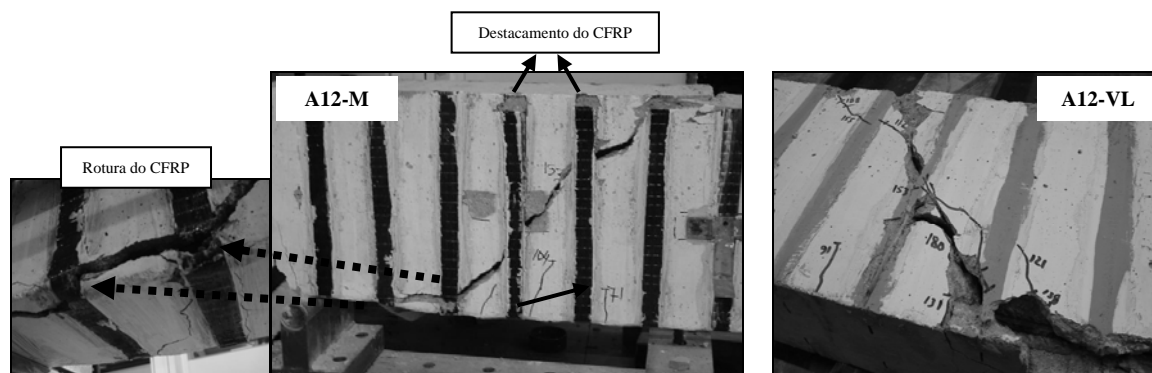
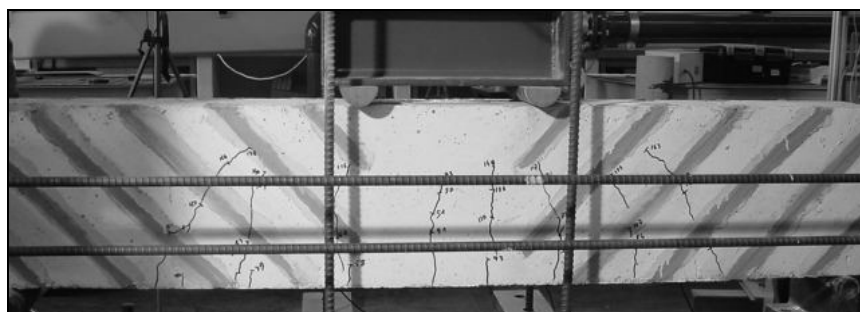
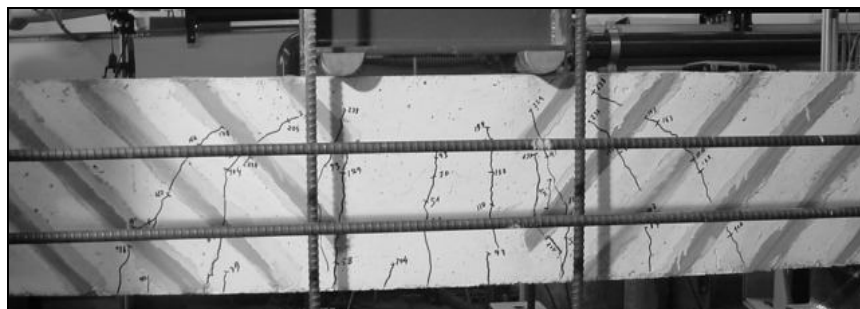


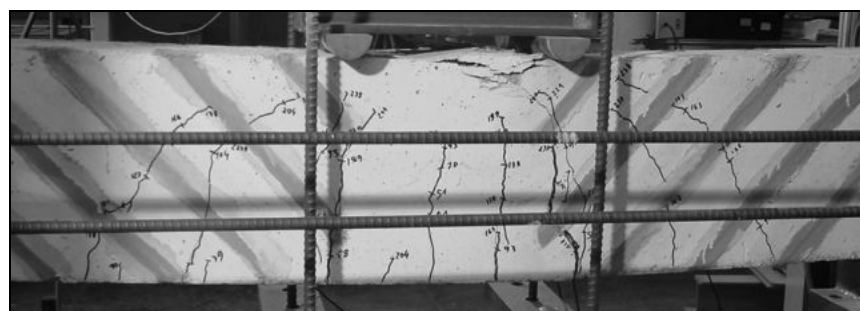
Figura 3.20 - Pormenor da zona de rotura da viga A12_M e da viga A12_VL.



Padrão de fendilhação instalado para uma carga de 160 kN (carga máxima = 262 kN).



Padrão de fendilhação instalado para uma carga de 230 kN (carga máxima = 262 kN).



Padrão de fendilhação instalado para uma carga de 262 kN (carga máxima).

Figura 3.21 - Fases do ensaio da viga A12_IL.

3.2.5.3 - Vigas da série B com 4 ϕ 10 longitudinais

Na Figura 3.22 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento central das vigas B10_C, B10_S, B10_M, B10_VL e B10_IL. Na Tabela 3.6 apresentam-se, para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores obtidos para F_{max} e δ_p . Além disso, apresentam-se os indicadores da eficácia das técnicas de reforço ao corte adoptadas em termos de aumento da capacidade máxima de carga e de deformação na rotura das vigas.

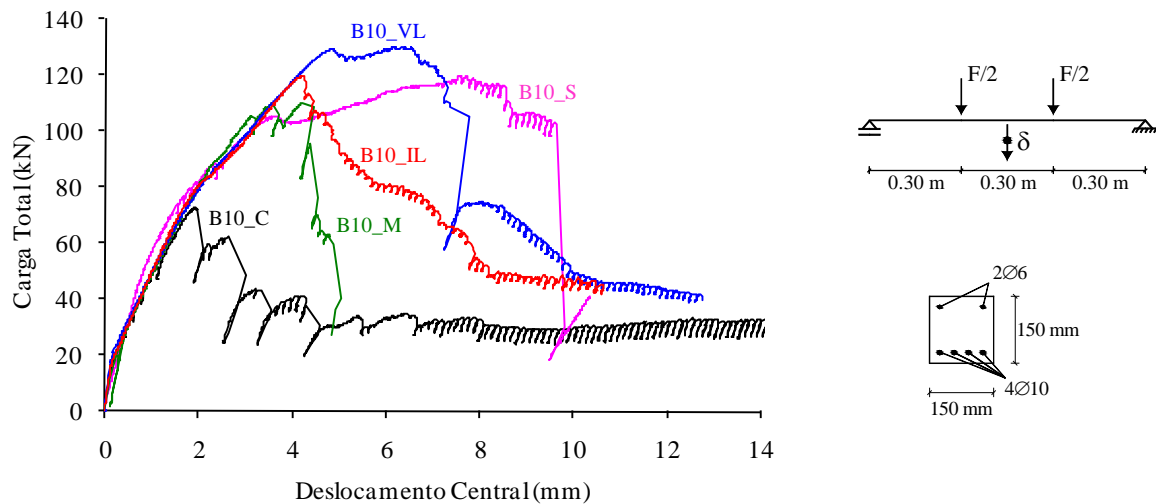


Figura 3.22 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série B (4 ϕ 10 longitudinais).

Tabela 3.6 - Comparação do comportamento último das vigas da série B com 4 ϕ 10.

Vigas	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, B10_C}$	$F_{max}/F_{max, B10_S}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_{p, B10_C}$	$\delta_p/\delta_{p, B10_S}$
B10_C	74.02	1.00	0.61	2.00	1.00	0.23
B10_S	120.64	1.63	1.00	8.53	4.27	1.00
B10_M	111.14	1.50	0.92	4.40	2.20	0.52
B10_VL	131.22	1.77	1.09	6.83	3.42	0.80
B10_IL	120.44	1.63	1.00	4.27	2.14	0.50

Da análise da Figura 3.22 e dos resultados apresentados na Tabela 3.6 verifica-se que a participação dos compósitos de CFRP (mantas e laminados) aumentou significativamente a capacidade máxima de carga da viga de referência B10_C (sem qualquer reforço ao corte). Tendo por base os resultados da viga B10_C constata-se que, em termos de F_{max} , os estribos permitiram um aumento de 63%, enquanto os CFRP garantiram incrementos de 50% a 77%, sendo o maior valor o registado na viga com laminados verticais (B10_VL) e o menor na viga com manta (B10_M). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com CFRP com a obtida na viga B10_S (com estribos)

verifica-se que a capacidade máxima de carga das vigas B10_M, B10_VL e B10_IL foi igual a 92%, 109% e 100% o valor de $F_{max,B10_S}$, respectivamente. As soluções das vigas B10_VL e B10_S proporcionaram a cedência das armaduras longitudinais.

Das formas de reforço ao corte com CFRP avaliadas, o melhor desempenho em termos de capacidade deformacional da viga na sua rotura foi garantido pelos laminados verticais. Quando comparado com o deslocamento δ_p verificado na viga B10_C ($\delta_{p,B10_C}$), o deslocamento δ_p registado na viga B10_S foi 327% superior, enquanto nas vigas reforçadas com laminados verticais, inclinados e com faixas de manta foi 242%, 114% e 120% superior, respectivamente. O acréscimo de capacidade deformacional na rotura proporcionado pela solução de laminados verticais foi 80% do acréscimo proporcionado pela viga estribada.

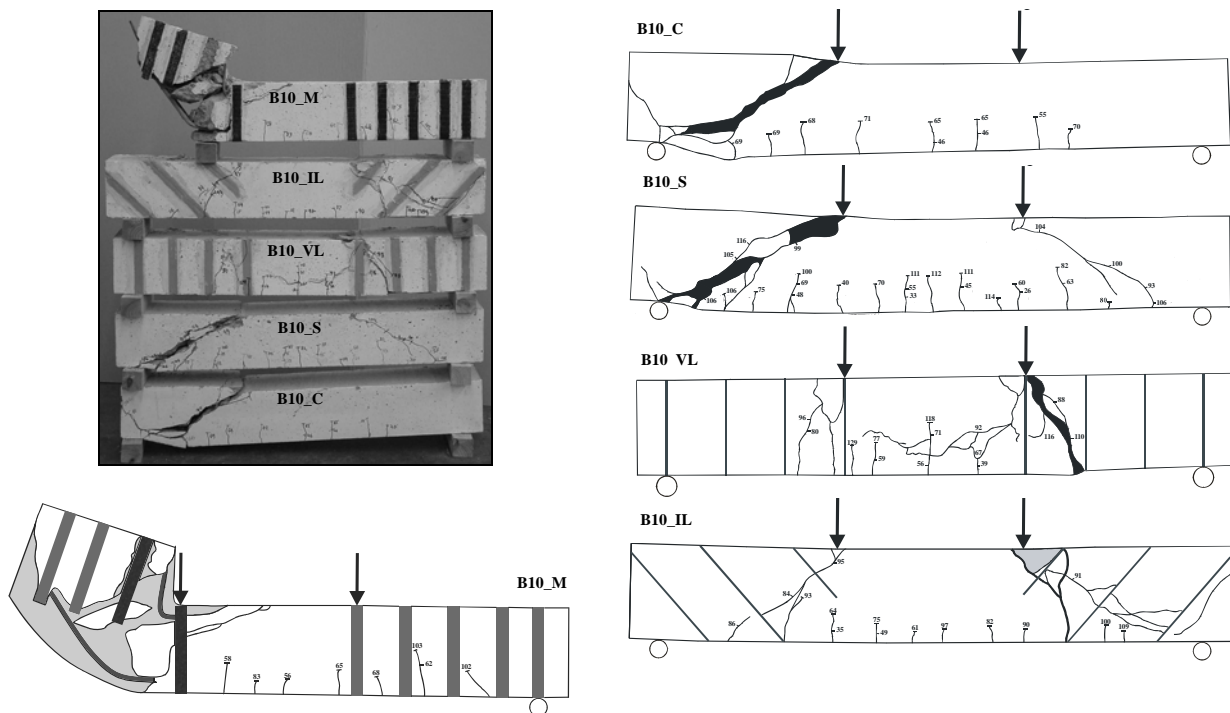


Figura 3.23 - Modos de rotura verificados nas vigas da série B com 4 ϕ 10 longitudinais.

Na Figura 3.23 apresentam-se os modos de rotura verificados nas cinco vigas ensaiadas. A rotura da viga B10_C esteve associada à ocorrência de uma fenda de corte, após se ter desenvolvido um pequeno número de fendas de flexão. Na viga estribada (B10_S), após o desenvolvimento de fendas de flexão (em maior número que no caso anterior) surgiram fendas de corte em cada um dos vãos de corte. A rotura acabou por ocorrer por abertura excessiva de uma dessas fendas, onde se deu a rotura do estribo aí localizado. O aumento da abertura da fenda de rotura de corte foi acompanhado pelo fecho das restantes fendas. A viga reforçada com faixas de manta (B10_M) atingiu a sua capacidade máxima de carga logo após a formação da fenda de rotura por corte com o destacamento do CFRP. As vigas reforçadas com laminados inseridos no betão de recobrimento apresentaram modos de rotura

menos frágeis que o verificado na viga B10_M (manta), principalmente a reforçada com laminados verticais (B10_VL). Na viga reforçada com laminados na vertical a resistência elevada dos laminados obrigou a fenda de rotura a progredir entre os dois primeiros laminados, a partir de um dos pontos de carga (ver viga B10_VL da Figura 3.23). Este facto deve ter conduzido à entrada em cedência da armadura longitudinal na zona de progressão da fenda de rotura, tendo proporcionado o aparecimento do patamar observado na resposta deformacional desta viga (ver Figura 3.22). O modo de rotura observado na viga B10_IL será comentado em conjunto com a análise dos modos de rotura das vigas da série B com 4 ϕ 12 longitudinais.

3.2.5.4 - Vigas da série B com 4 ϕ 12 longitudinais

Na Figura 3.24 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento central das vigas B12_C, B12_S, B12_M, B12_VL e B12_IL. Na Tabela 3.7 apresentam-se, para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores obtidos para F_{max} e δ_p . Além disso, apresentam-se os indicadores da eficácia das técnicas de reforço ao corte adoptadas em termos de aumento da capacidade máxima de carga e de deformação na rotura das vigas.

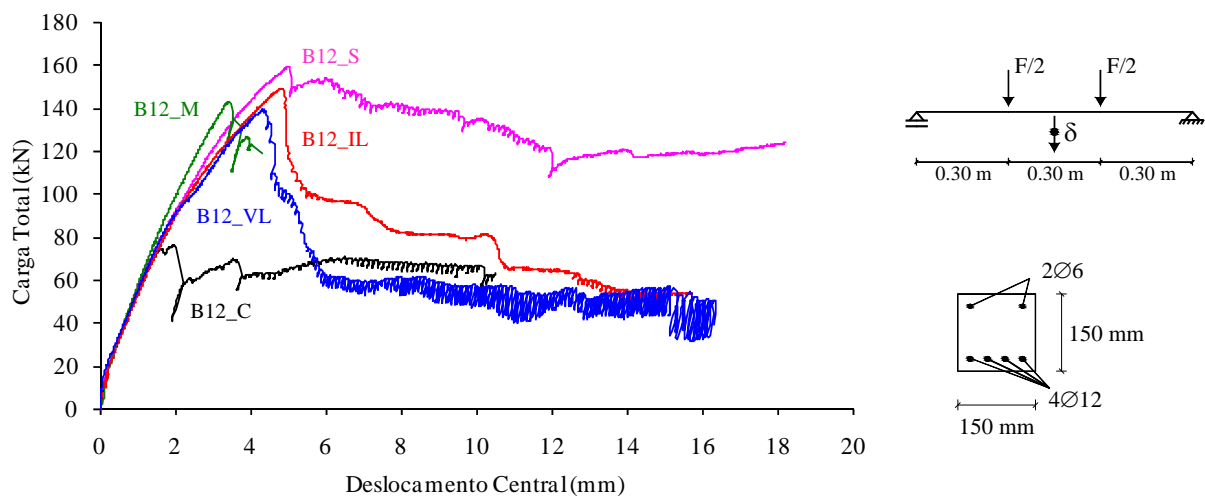


Figura 3.24 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas da série B (4 ϕ 12 longitudinais).

Tabela 3.7 - Comparação do comportamento último das vigas da série B com 4 ϕ 12.

Vigas	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, B12_C}$	$F_{max}/F_{max, B12_S}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_{p, B12_C}$	$\delta_p/\delta_{p, B12_S}$
B12_C	75.7	1.00	0.48	2.03	1.00	0.40
B12_S	159.1	2.10	1.00	5.09	2.51	1.00
B12_M	143.0	1.89	0.90	3.52	1.73	0.69
B12_VL	139.2	1.84	0.87	4.44	2.19	0.87
B12_IL	148.5	1.96	0.93	4.92	2.42	0.97

Da análise da Figura 3.24 e dos resultados apresentados na Tabela 3.7 verifica-se que a adopção dos compósitos de CFRP (mantas e laminados), como solução de reforço ao corte, proporcionou aumentos de capacidade de carga e de capacidade deformacional. Tendo por base os resultados da viga B12_C constata-se que, em termos da força F_{max} , os estribos colocados na viga B12_S permitiram um aumento de 110%, enquanto os CFRP garantiram incrementos de 84% a 96%, sendo o maior valor o registado na viga com laminados inclinados (B12_IL) e o menor na viga com laminados verticais (B12_VL). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com CFRP com a observada na viga B12_S (com estribos) verifica-se que a capacidade máxima de carga das vigas B12_M, B12_VL e B12_IL foi igual a 90%, 87% e 93% do valor de $F_{max,B12_S}$, respectivamente.

Das formas de reforço ao corte com CFRP avaliadas, o melhor desempenho em termos de capacidade deformacional da viga na sua rotura foi garantido pelos laminados inclinados a 45°. Quando comparado com o deslocamento δ_p da viga B12_C ($\delta_{p,B12_C}$), o deslocamento δ_p registado das vigas B12_S, B12_M, B12_VL e B12_IL foi, respectivamente, 151%, 73%, 119% e 142% superior, isto é, a viga reforçada com laminados inclinados a 45° proporcionou um acréscimo de capacidade deformacional 97% do acréscimo proporcionado pela viga estribada. A capacidade deformacional da viga B12_M foi 69% da verificada na viga B12_S.

Na Figura 3.25 apresentam-se os modos de rotura verificados nas cinco vigas ensaiadas. As primeiras fendas que surgiram na viga B12_C foram de flexão. Com o aumento do carregamento surgiram duas fendas de corte (uma em cada vão de corte). A ruína da viga ocorreu pela abertura excessiva de uma dessas fendas. Na viga estribada (B12_S), após o desenvolvimento de fendas de flexão (em maior número que no caso anterior) surgiram fendas de corte em cada um dos vãos de corte. A rotura acabou por ocorrer por abertura excessiva de uma dessas fendas que originou a rotura de um dos estribos que atravessam essa fenda. Em ambas as vigas, o aumento da abertura da fenda de corte foi acompanhado pelo fecho das restantes fendas. A viga reforçada com faixas de manta (B12_M) teve um modo de rotura distinto daquele que se verificou nas restantes vigas reforçadas com CFRP usando a técnica da colagem externa (A10_M, A12_M e B10_M). A rotura da viga B12_M aconteceu com a formação de duas “paredes laterais de betão” com cerca de 15-20 mm que se destacaram do volume de betão interior. A justificação para este distinto modo de rotura relaciona-se com a relação entre o valor da área de CFRP e a área de betão da face lateral da viga. Devido à elevada percentagem de CFRP na viga B12_M (a mais elevada de todas as vigas com mantas), a fenda de rotura de corte não se estendeu em toda a largura da viga. Este modo de rotura complexo ocorreu também nas vigas B10_IL, B12_VL e B12_IL (Figura 3.26).

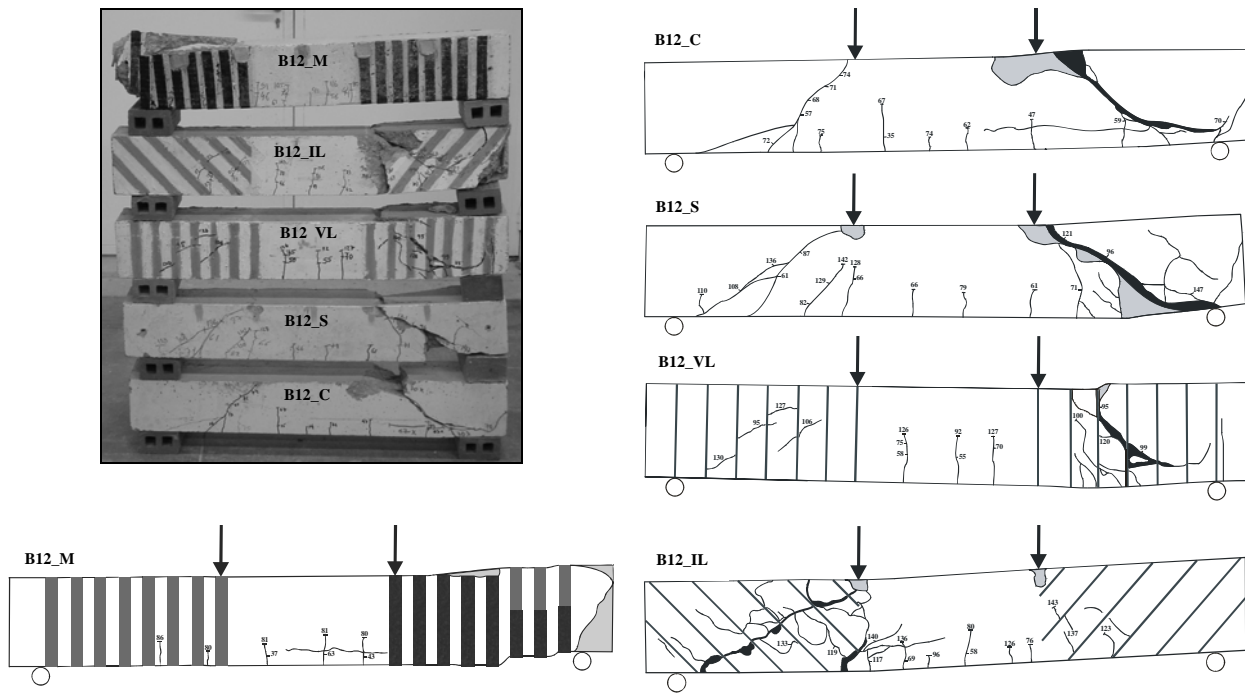


Figura 3.25 - Modos de rotura verificados nas vigas da série B com 4 ϕ 12 longitudinais.

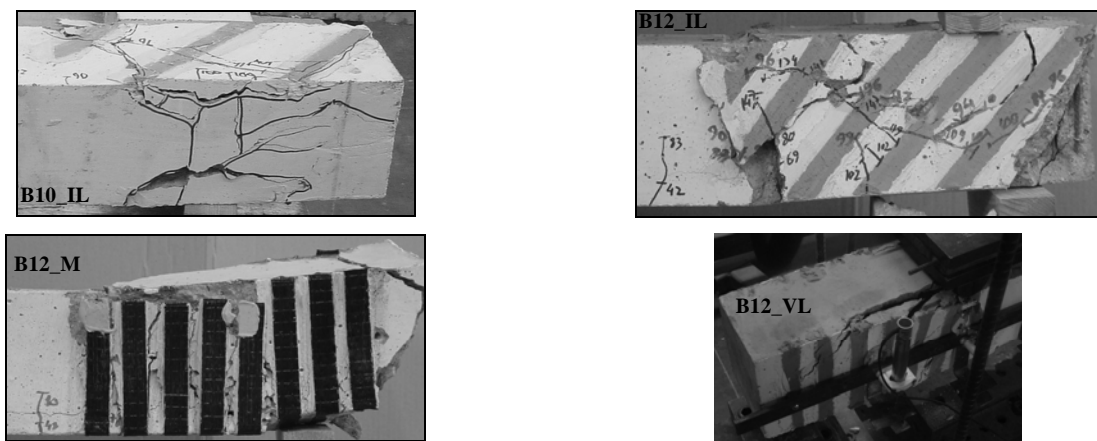


Figura 3.26 - Pormenor dos modos de rotura das vigas B10_IL, B12_IL, B12_M e B12_VL.

3.2.6 - Análise dos resultados

Nesta secção serão analisados os resultados obtidos no programa experimental e que foram apresentados na secção anterior. Complementarmente aos resultados já apresentados, e de forma avaliar o rendimento do reforço de CFRP foi determinado, para cada uma das vigas reforçadas com CFRP, o valor da extensão efectiva (ϵ_{fe}) a partir do valor da contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f). Para tal, foi utilizada a expressão (A.8) do anexo A desta dissertação. Assim, partindo do valor da carga máxima (F_{max}) foi possível obter o respectivo valor da resistência máxima ao esforço transversal (V_{total}) por (ver Figura 3.4):

$$V_{total} = 0.5F_{max} \quad (3.2)$$

Adoptando, para o caso das vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de CFRP (inseridos no betão de recobrimento ou colados externamente), o mesmo princípio que é utilizado nos códigos de dimensionamento para a quantificação da parcela resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado, tem-se:

$$V_{total} = V_c + V_s + V_f \quad (3.3)$$

ou seja, às contribuições do betão (V_c) e dos estribos de aço (V_s) é adicionada a contribuição do reforço ao corte com CFRP (V_f). No caso dos modelos ensaiados neste programa experimental a expressão (3.3) reduz-se a:

$$V_{total} = V_c + V_s \quad (3.4)$$

para o caso dos modelos estribados e

$$V_{total} = V_c + V_f \quad (3.5)$$

para o caso dos modelos com CFRP. Para cada uma das séries de vigas testadas a contribuição do betão (V_c) foi obtida por intermédio do resultado da viga de referência sem qualquer elemento de reforço ao esforço transversal ($V_c = 0.5F_{max,K_C}$).

Na Tabela 3.8, além dos valores de F_{max} e V_{total} , apresentam-se os valores obtidos para a contribuição de cada um dos elementos resistentes ao esforço transversal (V_c para o betão, V_s para os estribos de aço e V_f para o CFRP) e os valores da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) para cada uma das soluções de reforço de CFRP testadas. Nos pontos seguintes é realizada a análise aos resultados obtidos no programa de ensaios descrito neste capítulo.

3.2.6.1 - Técnica NSM com laminados CFRP vs técnica EBR com mantas de CFRP

Os resultados registados na presente campanha de ensaios permitiram concluir que a utilização de compósitos de CFRP como elementos resistentes ao esforço transversal, colados externamente (mantas) ou inseridos no betão de recobrimento (laminados), permite aumentos significativos da capacidade de carga e da capacidade de deformação de vigas de betão armado com rotura por corte. Comparando as duas técnicas de reforço com CFRP, a NSM com laminados foi mais eficaz em termos de capacidade máxima resistente, capacidade deformacional na rotura e carga residual pós-pico. Tendo por base o valor da força máxima dos modelos sem qualquer tipo de reforço ao esforço transversal (vigas A10_C, A12_C, B10_C e B12_C), verificou-se que a capacidade de carga máxima dos modelos reforçados com faixas de manta e com laminados inseridos aumentou, em média, 54% e 83%, respectivamente. O mesmo tipo de comparação em termos de capacidade deformacional na

rotura (δ_p) mostrou que o deslocamento δ_p nos modelos reforçados com faixas de manta e com laminados inseridos aumentou, em média, 77% e 307%, respectivamente.

Em vários modelos ensaiados a técnica NSM conduziu à cedência das armaduras longitudinais e, em alguns casos, o modo de rotura foi por flexão (esmagamento do betão). Em nenhuma das vigas reforçadas com mantas coladas externamente ocorreu a cedência das armaduras longitudinais.

Tabela 3.8 - Carga máxima, esforço transversal resistente, contribuição do betão, dos estribos de aço e dos CFRP na resistência ao corte das vigas ensaiadas, e extensão última no CFRP.

Designação das vigas	Reforço ao corte	F_{max} [kN]	V_{total} [kN]	V_c [kN]	V_s [kN]	V_f [kN]	ε_{fe} [‰]
Série A10	A10_C	-	100.40	50.2	-	-	-
	A10_S	Estribos	169.35	84.7	34.5	-	-
	A10_M	Manta (EBR)	122.06	61.0	50.2	-	10.8
	A10_VL	Laminados verticais (NSM)	158.64	79.3	-	29.1	5.08
	A10_IL	Laminados inclinados (NSM)	157.90	79.0	-	28.8	5.33
Série A12	A12_C	-	116.50	58.3	-	-	-
	A12_S	Estribos	215.04	107.5	49.2	-	-
	A12_M	Manta (EBR)	179.54	89.8	58.3	-	31.5
	A12_VL	Laminados verticais (NSM)	235.11	117.6	-	59.3	5.19
	A12_IL	Laminados inclinados (NSM)	262.38	131.2	-	72.9	6.77
Série B10	B10_C	-	74.02	37.0	-	-	-
	B10_S	Estribos	120.64	60.3	23.3	-	-
	B10_M	Manta (EBR)	111.14	55.6	37.0	-	18.6
	B10_VL	Laminados verticais (NSM)	131.22	65.6	-	28.6	5.51
	B10_IL	Laminados inclinados (NSM)	120.44	60.2	-	23.2	4.74
Série B12	B12_C	-	75.7	37.9	-	-	-
	B12_S	Estribos	159.1	79.6	41.7	-	-
	B12_M	Manta (EBR)	143.0	71.5	37.9	-	33.6
	B12_VL	Laminados verticais (NSM)	139.2	69.6	-	31.7	3.08
	B12_IL	Laminados inclinados (NSM)	148.5	74.3	-	36.4	3.75

A maior eficácia da técnica NSM com laminados foi também evidente em termos do rendimento do CFRP. Com efeito, o valor médio da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) foi de 4.93‰ no caso dos laminados inseridos e foi de 1.77‰ no caso das mantas coladas externamente, ou seja, em termos de efectividade do CFRP a técnica NSM foi 2.79 vezes superior à técnica EBR.

3.2.6.2 - Reforço com CFRP vs solução convencional de betão armado com estribos de aço

As vigas reforçadas com laminados inseridos apresentaram carga máxima e capacidade deformacional semelhantes às registadas nas vigas estribadas. Tendo por base os resultados obtidos nos modelos não reforçados, verificou-se que os modelos reforçados com estribos de aço e com laminados de CFRP apresentaram um aumento médio da carga máxima de 82% e 83%, respectivamente (no caso das mantas o aumento médio da carga máxima foi de 54%). Tendo por base os resultados obtidos nos modelos não reforçados, verificou-se que os modelos reforçados com estribos de aço e com laminados inseridos apresentaram uma capacidade deformacional, respectivamente, 272% e 307% superior (no caso das mantas foi de 77% superior).

3.2.6.3 - Efeito da percentagem de CFRP, da altura da viga e da percentagem de armadura longitudinal na eficácia das técnicas de reforço ao corte com CFRP

Na Figura 3.27 apresenta-se a influência da percentagem de CFRP (ρ_f), da altura da viga (h) e da percentagem de armadura longitudinal (ρ_{sl}) no ganho de resistência conferido pelos reforços de CFRP testados. O parâmetro ΔF_{max} (diferença entre a capacidade máxima de carga da viga com reforço de CFRP e a da viga de referência sem qualquer reforço ao corte) corresponde ao dobro da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal da viga (V_f), ou seja, $\Delta F_{max} = 2 V_f$. De forma a atender ao facto dos CFRP terem módulos de elasticidade distintos, as percentagens de reforço ρ_f das mantas de CFRP foram convertidas em percentagens equivalentes em termos de laminados, multiplicando a sua percentagem pelo parâmetro E_{f_M}/E_{f_L} , em que E_{f_M} e E_{f_L} são o módulo de elasticidade da mantas e do laminado, respectivamente ($E_{f_M} = 390\text{GPa}$ e $E_{f_L} = 166\text{GPa}$).

Da análise da Figura 3.27-a é possível concluir que o valor de ΔF_{max} aumenta com a percentagem de reforço, ρ_f , sendo este aumento mais significativo nas vigas mais altas e que foram reforçadas com a técnica NSM. A Figura 3.27-b permite verificar que para as vigas reforçadas usando a técnica EBR o valor de ΔF_{max} diminui com o aumento da altura da viga, enquanto nas vigas reforçadas com a técnica NSM o parâmetro ΔF_{max} aumenta com o aumento da altura da viga. Este aumento foi mais pronunciado nas vigas com a maior percentagem de armadura longitudinal (4φ12), principalmente as

vigas reforçadas com laminados a 45°. Da análise da Figura 3.27-c é possível verificar que o valor de ΔF_{max} aumenta com a percentagem de armadura longitudinal (ρ_{sl}) e este aumento é mais pronunciado nas vigas reforçadas com a técnica NSM. Independentemente da variação dos parâmetros ρ_f , h e ρ_{sl} , o desempenho dos modelos reforçados usando a técnica NSM com laminados foi sempre superior ao dos modelos reforçados com a técnica EBR.

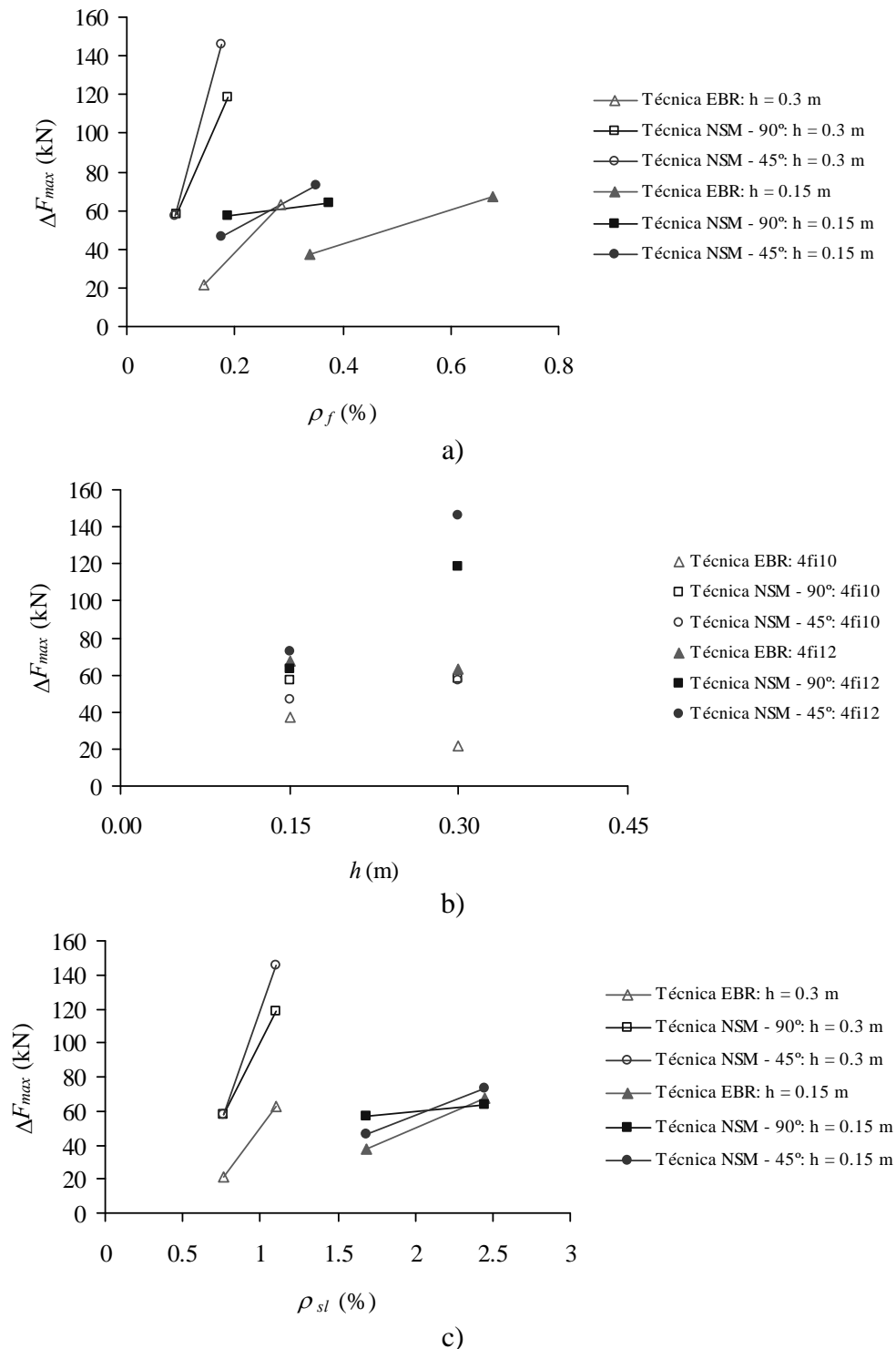


Figura 3.27 - Influência na eficácia das técnicas de reforço testadas dos seguintes parâmetros: a) percentagem de CFRP, b) altura da viga e c) percentagem de armadura longitudinal.

3.2.6.4 - Rendimento do CFRP vs material gasto (técnica NSM)

Após a análise dos resultados em termos de comparação directa das duas técnicas de reforço ao corte com CFRP testadas será, de seguida, efectuada uma análise do grau de eficácia obtido com o reforço ao corte de vigas de betão armado utilizando-se laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. Nesta análise é considerada a quantidade de material de reforço utilizado em termos de metros lineares de laminados de CFRP. Na Tabela 3.9 apresentam-se, para cada uma das vigas reforçadas segundo a técnica anteriormente referida, o ganho de resistência, ΔF_{max} , conferido pelos CFRP, o respectivo comprimento de reforço utilizado (l_{cfrp}) e a relação entre o rendimento do reforço e o comprimento de CFRP utilizado ($\Delta F_{max}/l_{cfrp}$). Com estes valores foi elaborado o gráfico representado na Figura 3.28.

Tabela 3.9 - Rendimento dos CFRP vs material gasto.

Séries	Vigas	F_{max} [kN]	ΔF_{max} [kN]	l_{cfrp} [m]	$\Delta F_{max}/l_{cfrp}^{**}$ [kN/m]
A ($h = 0.30m$)	A10_C *	100.4	-	-	-
	A10_VL	158.64	58.24	4.8	12.13
	A10_IL	157.9	57.5	3.68	15.63
	A12_C *	116.5	-	-	-
	A12_VL	235.11	118.61	8.4	14.12
	A12_IL	262.38	145.88	7.35	19.85
B ($h = 0.15m$)	B10_C *	74.02	-	-	-
	B10_VL	131.22	57.2	2.4	23.83
	B10_IL	120.44	46.42	1.97	23.56
	B12_C *	75.7	-	-	-
	B12_VL	139.2	63.5	4.2	15.12
	B12_IL	148.5	72.8	3.91	18.62

* Vigas de referência (sem reforço ao corte); ** Grau de eficácia do reforço.

A análise da Tabela 3.9 e da Figura 3.28 permite constatar que a relação ganho de resistência vs comprimento do CFRP é superior para o caso dos laminados inseridos em entalhes inclinados a 45°, tornando esta solução mais económica do que a que recorre à inserção de laminados em entalhes verticais. Além disso, a técnica NSM com laminados de CFRP proporcionou valores da relação ganho de resistência/comprimento de CFRP mais elevados para as vigas da série B, o que leva a concluir que se trata de uma técnica de reforço eficaz para elementos de pequena altura.

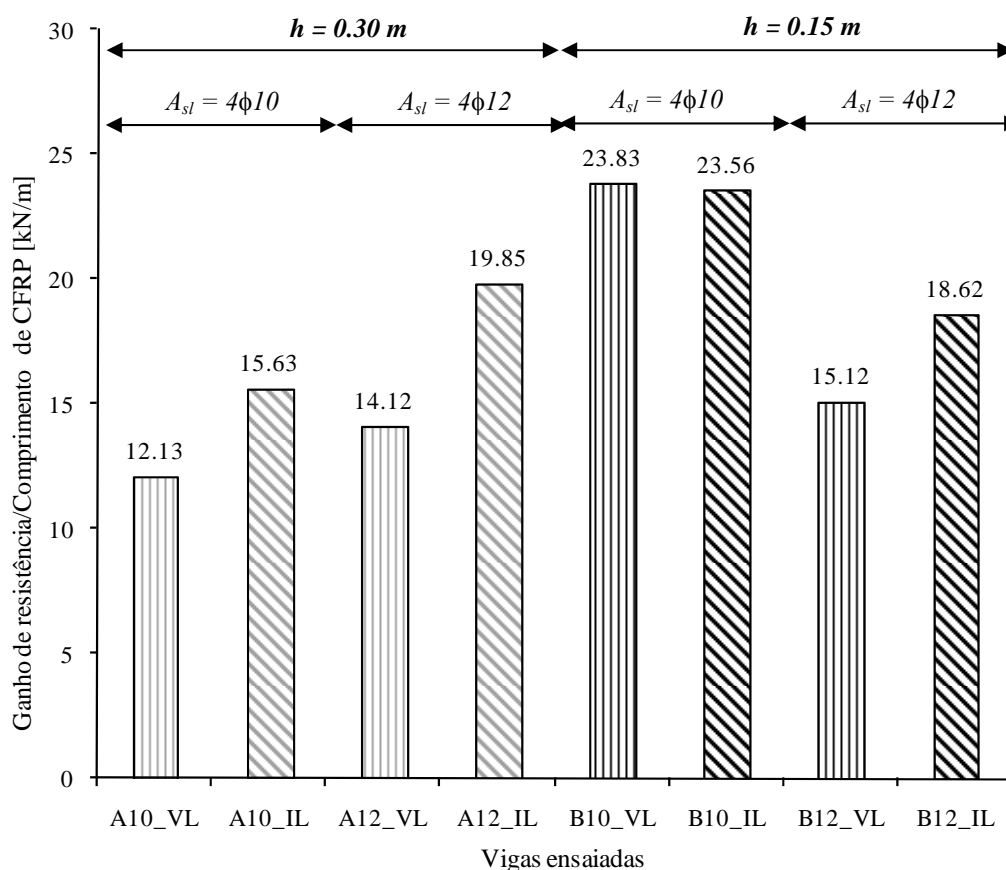


Figura 3.28 - Valores do ganho de resistência por comprimento de CFRP aplicado nas vigas reforçadas ao corte com laminados inseridos.

3.3 - CONCLUSÕES

Neste capítulo foi efectuada a apresentação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado. Além da descrição das etapas a percorrer na execução deste tipo de reforço, foi também dado particular relevo ao facto do seu desempenho depender do controlo de qualidade assegurado, quer nos procedimentos de reforço como dos materiais aplicados. É fundamental que o aplicador tenha conhecimento das boas práticas de execução da técnica e que sejam efectuados ensaios para garantir que os valores das propriedades dos materiais aplicados satisfaçam os requisitos considerados no projecto.

A investigação experimental descrita neste capítulo teve como objectivo avaliar a viabilidade da técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado por inserção de laminados de CFRP em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. O desempenho desta técnica foi comparado com o da técnica por colagem externa de mantas de CFRP. O estudo que foi realizado permitiu verificar que a técnica de reforço ao corte proposta nesta dissertação, em comparação com a técnica por colagem externa, proporciona um melhor comportamento estrutural

das vigas reforçadas. O comportamento das vigas com laminados de CFRP foi semelhante ao das vigas estribadas em termos de capacidade máxima de carga e teve um melhor desempenho em termos de capacidade deformacional na rotura. Além disso, verificou-se que a técnica NSM com laminados é mais simples e rápida de executar do que a técnica EBR. Face às conclusões agora referidas é possível afirmar que a técnica NSM com laminados de CFRP é uma técnica viável para intervenções de reforço ao corte de vigas de betão armado.

Capítulo 4

Análise experimental da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado

A realização do programa de ensaios descrito no capítulo anterior validou a técnica de reforço ao corte proposta nesta dissertação. Na sequência da referida validação, efectuada em vigas de betão armado de pequenas dimensões, com secção transversal rectangular e sem conterem qualquer percentagem de estribos de aço, houve necessidade de efectuar investigação experimental que permitisse adquirir uma maior sensibilização ao comportamento que uma viga de betão armado reforçada ao corte, usando a técnica NSM com laminados de CFRP, pode apresentar. Com este propósito, foi realizado um extenso programa de ensaios experimentais em vigas T de betão armado, tendo o reforço de CFRP sido inserido em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da alma das vigas (Figura 3.3). Os parâmetros avaliados nesta investigação foram a percentagem e orientação dos laminados, a percentagem da armadura transversal (estribos de aço), a classe de resistência do betão e a relação entre o vão de corte e a altura útil da secção transversal (relação a/d). O efeito da pré-fendilhação do betão, previamente à aplicação do reforço de CFRP, foi também objecto de análise. À semelhança do que foi realizado no estudo experimental descrito no Capítulo 3, para o caso de vigas de secção transversal rectangular, neste programa de ensaios (vigas T) foi igualmente efectuada uma comparação entre a eficácia, no reforço ao corte, da técnica NSM com laminados de CFRP com a da técnica da colagem externa de mantas de CFRP e com a da solução convencional de betão armado (estribos de aço). O programa experimental englobou quatro séries de vigas (A, B, C e D) e sua apresentação geral será efectuada na parte inicial deste capítulo. Posteriormente, cada uma das referidas séries de vigas será detalhadamente descrita e serão apresentados e analisados os resultados que foram obtidos.

4.1 - APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A definição dos modelos ensaiados no programa experimental a ser apresentado neste capítulo teve como base um conjunto de requisitos que foram previamente estabelecidos. O primeiro foi que os modelos de vigas a adoptar simulassem, relativamente aos modelos testados no programa de ensaios do Capítulo 3, cenários mais próximos daqueles que podem ocorrer numa intervenção de reforço. Para tal, estipulou-se que seriam adoptadas vigas de betão armado de secção transversal em T (Figura 4.1) e que as vigas reforçadas ao corte com CFRP continham uma determinada percentagem de

armadura transversal (estribos de aço verticais). As dimensões adoptadas para as vigas tinham que ir ao encontro do requisito anteriormente referido e deveriam ser tais que minimizassem a interferência de efeitos de escala nos resultados experimentais a obter. O modo de rotura por corte foi outra condição inicial imposta, de forma a que pudesse ser avaliado o contributo do reforço ao esforço transversal na sua plenitude, ou seja, foi imposto que o real rendimento da solução de reforço ao corte não fosse “viciado” por modos de rotura por flexão. Assim, no pré-dimensionamento dos modelos foi necessário garantir que a carga de rotura da viga por flexão fosse superior à carga de rotura por corte. Além da imposição do modo de rotura, foi ainda definido que a sua localização seria restringida sempre à mesma zona da viga. Desta forma, as vigas foram sujeitas a ensaios à flexão em três pontos de carga, tendo a rotura por corte sido circunscrita a um dos vãos de corte da viga (vão de corte a - ver Figura 4.1). Para tal, as vigas foram suficientemente bem estribadas no outro vão de corte (vão de corte b - ver Figura 4.1). Com o objectivo de isolar perfeitamente o fenómeno do reforço ao corte, as diferenças entre modelos, em cada uma das séries de vigas ensaiadas, deveriam ficar restritas aos elementos resistentes ao esforço transversal adoptados no vão de corte onde a rotura foi imposta (vão de corte a). Face ao exposto, e tal como representado na Figura 4.1, o reforço ao corte de CFRP apenas foi aplicado no vão de corte a .

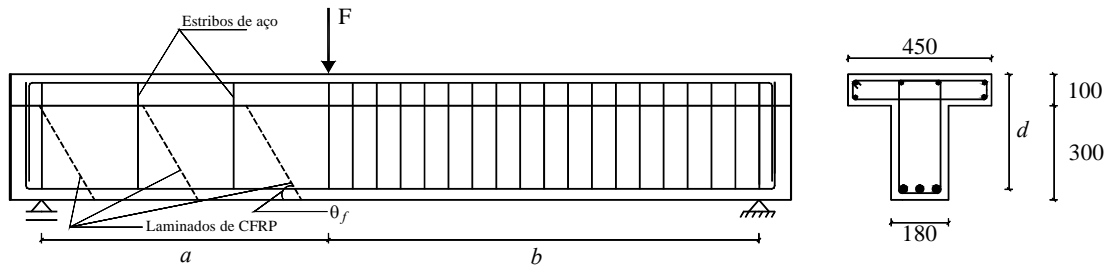


Figura 4.1 - Dados gerais sobre as vigas ensaiadas (dimensões em mm).

A par dos requisitos anteriormente relatados, na definição do presente programa experimental foi estipulado que deveria ser avaliado o efeito dos parâmetros que, potencialmente, teriam mais influência no desempenho da técnica de reforço testada, tendo em consideração os ensinamentos recolhidos na revisão bibliográfica efectuada no Capítulo 2 e no trabalho experimental apresentado no Capítulo 3. Além disso, também foi tida em linha de conta a necessidade fundamental de estudar, dentro de um mesmo programa experimental, vários parâmetros isoladamente e não os colocar a variar simultaneamente.

O programa experimental foi constituído por quatro séries de vigas de betão armado (séries A, B, C e D). As vigas testadas, tal como representado na Figura 4.1, tinham uma secção transversal T com 0.40 m de altura. A alma tinha uma largura de 0.18 m e uma altura de 0.30 m, enquanto o banzo tinha 0.10 m de altura e 0.45 m de largura.

Tabela 4.1 - Parâmetros avaliados nas quatro séries de vigas ensaiadas.

Série	ρ_f [%]	θ_f [°]	ρ_{sw} [%]	f_{cm} [MPa]	a/d
A ($\rho_{sl} = 2.9\%$)	0.06				
	0.09-0.10	90	45	60	0.10
	0.13-0.16 ⁽¹⁾			31.1	
B ($\rho_{sl} = 2.8\%$)	0.07-0.08 ⁽²⁾				
	0.11-0.13 ⁽²⁾			0.10	
	0.16-0.19 ^{(1), (2)}	90	45	60	39.7
	0.07-0.08 ^{(2), (3)}				2.5
	0.11-0.13 ⁽²⁾			0.17	
C ($\rho_{sl} = 2.8\%$)	0.07-0.08	90	45	60	
	0.11-0.13				18.6
	0.07-0.08	45	60	0.17	
	0.11-0.13				
D ($\rho_{sl} = 3.1\%$)	0.07-0.08 ⁽⁴⁾	90	45 ⁽⁴⁾	60	0.10
	0.11-0.13				59.4
	0.07-0.08 ⁽⁴⁾	45 ⁽⁴⁾	60 ⁽⁴⁾	0.16	3.3
	0.11-0.13				

(1) Para esta gama de percentagem de reforço foi ensaiada uma viga de betão armado sem CFRP com capacidade de carga máxima semelhante à das vigas com CFRP (no caso da série A a viga tinha um número de estribos a que correspondia uma percentagem $\rho_{sw} = 0.24\%$ e no caso da série B a viga tinha um número de estribos a que correspondia uma percentagem $\rho_{sw} = 0.28\%$).

(2) Ensaio de vigas de betão armado reforçadas ao corte com mantas de CFRP coladas externamente.

(3) Para a menor percentagem de CFRP referente à solução de laminados verticais foram estudadas duas soluções de distribuição do CFRP.

(4) Avaliação do efeito da instalação de um estado de fendilhação no betão antes da aplicação do reforço de CFRP.

Na Tabela 4.1 está condensada a informação relativa aos parâmetros que caracterizavam cada uma das séries de vigas testadas: percentagem de armadura longitudinal (ρ_{sl} obtida pela equação (2.6)); percentagem de reforço ao corte com CFRP (ρ_f obtida pela equação (3.1)); orientação do reforço de CFRP (θ_f - ângulo relativamente ao eixo da viga - ver Figura 4.1); percentagem de armadura transversal (ρ_{sw} obtida pela equação (2.5)); valor médio da resistência à compressão do betão à data dos ensaios das vigas (f_{cm}), obtida em ensaios à compressão em cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 3.5); e o valor da relação a/d (ver Figura 4.1). Uma análise geral aos dados da Tabela 4.1 permite verificar que os modelos ensaiados apresentavam percentagens de armadura longitudinal cerca dos 3% e tinham percentagens de armaduras transversais no vão de corte a que variavam entre os 0.10% e os 0.17%. Em termos de betão foram, fundamentalmente, utilizados três tipos: um betão de classe de resistência baixa ($f_{cm} = 18.6$ MPa), um betão de classe de resistência média ($f_{cm} = 31.1/39.7$ MPa) e um betão de classe de resistência elevada ($f_{cm} = 59.4$ MPa). Quanto ao reforço com CFRP foram analisadas três orientações dos laminados em relação ao eixo da viga ($\theta_f =$

90° - laminados verticais; $\theta_f = 45^\circ$ - laminados inclinados a 45°; e $\theta_f = 60^\circ$ - laminados inclinados a 60°) e a gama de percentagens do reforço de CFRP variou entre os 0.06% e os 0.19%. Os modelos de vigas das séries A, B e C tinham um valor da relação $a/d = 2.5$ ($b = 1.5a$) e os da série D tinham um valor de $a/d = 3.3$ ($a = b$).

Na série A ($f_{cm} = 31.1$ MPa) foi dado particular relevo ao efeito da percentagem (ρ_f) e da orientação dos laminados de CFRP (θ_f) quando aplicados no reforço ao corte de vigas T de betão armado contendo uma percentagem de estribos de aço no vão de corte a igual a 0.10%. Foram testadas três gamas de percentagens de CFRP ($\rho_f = 0.06$; $\rho_f = 0.09-0.10$; $\rho_f = 0.13-0.16$) e, para cada uma das referidas percentagens, foram analisadas três orientações diferentes do CFRP ($\theta_f = 90^\circ$; $\theta_f = 45^\circ$; $\theta_f = 60^\circ$). Tal como foi efectuado no programa experimental apresentado no Capítulo 3, na série A foi ensaiada uma viga de betão armado com uma percentagem de estribos de aço no vão de corte a ($\rho_{sw} = 0.24\%$) determinada de forma a que a capacidade máxima de carga da referida viga fosse semelhante às das vigas reforçadas com a maior percentagem de CFRP testada nesta série.

A série B ($f_{cm} = 39.7$ MPa) teve como objectivos alargar a gama das percentagens de CFRP testadas na série A, tendo sido analisados três novos níveis de ρ_f ($\rho_f = 0.07-0.08$; $\rho_f = 0.11-0.13$; $\rho_f = 0.16-0.19$), e avaliar o efeito da percentagem de estribos de aço na eficácia da técnica de reforço em análise. Para este último propósito, várias soluções de reforço de CFRP foram aplicadas quer em vigas com uma percentagem de $\rho_{sw} = 0.10\%$ como em vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$. Na série B, à semelhança do que foi feito na série A, foi ensaiada uma viga de betão armado que continha uma percentagem de estribos de aço no vão de corte a ($\rho_{sw} = 0.28\%$) determinada de forma a que a capacidade máxima de carga da referida viga fosse semelhante às das vigas com a maior percentagem de CFRP testada nesta série. Para cada uma das percentagens de laminados testadas foi ensaiada uma viga reforçada ao corte com mantas de CFRP coladas externamente. Desta forma, foi possível efectuar uma análise comparativa da eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP com a da técnica da colagem externa de mantas de CFRP, no reforço ao corte de vigas T de betão armado contendo uma determinada percentagem de estribos de aço. Por último, refira-se que para a solução de laminados verticais com a menor percentagem de CFRP foram ensaiadas duas vigas ($\rho_{sw} = 0.17\%$) com o mesmo número e espaçamento dos laminados e que se diferenciavam pelo posicionamento destes relativamente à distribuição dos estribos de aço.

Na série C foi testado o efeito da classe de resistência do betão na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte. Além disso, as vigas desta série continham um betão de resistência baixa ($f_{cm} = 18.6$ MPa) por forma a ser avaliada a possibilidade da aplicação da técnica de reforço em estudo a estruturas em que o betão seja de qualidade fraca. Assim, na série de vigas C

foram consideradas algumas das soluções de reforço ao corte de CFRP testadas na série B, variando unicamente a gama da resistência do betão (passagem de um betão com $f_{cm} = 39.7$ MPa da série B para um betão com $f_{cm} = 18.6$ MPa da série C). As soluções de reforço adoptadas englobavam duas gamas de percentagens de CFRP e, para cada uma destas, três orientações para os laminados. O reforço foi aplicado quer em vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ como em vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$.

A série D ($f_{cm} = 59.4$ MPa) foi concebida por forma a ser avaliado o efeito da relação a/d . Para tal, foram aplicadas algumas das soluções de reforço testadas na série B ($a/d = 2.5$) em vigas com uma relação $a/d = 3.3$. As soluções de reforço adoptadas englobavam duas percentagens de CFRP e, para cada uma destas, três orientações para os laminados. O reforço foi aplicado quer em vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ como em vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$. Além da análise do parâmetro a/d , na série de vigas D parte das soluções de reforço de CFRP, anteriormente referidas, foram aplicadas a modelos com e sem um padrão de fendilhação instalado previamente à aplicação do reforço de CFRP. Desta forma, pretendeu-se avaliar o desempenho da técnica de reforço em estudo quando o betão já se encontra com um determinado nível de fendilhação.

Nas secções seguintes serão apresentadas, pormenorizadamente, as quatro séries de vigas ensaiadas e que, de uma forma sintética, foram anteriormente descritas. Concretamente, cada série será abordada em termos da concepção dos modelos, da caracterização dos materiais, do sistema de ensaio, da instrumentação dos modelos e da apresentação e análise dos resultados obtidos. Os aspectos relacionados com a aplicação dos reforços de CFRP foram já detalhadamente apresentados no Capítulo 3. Como informação complementar refira-se que entre aplicação do reforço de CFRP e a realização do ensaio das vigas decorreu sempre, pelo menos, uma semana de forma a que fossem asseguradas as condições de cura do adesivo. Além disso, os laminados foram inseridos no betão de recobrimento das faces laterais da alma das vigas sem qualquer tipo de ancoragem ao banzo.

4.2 - SÉRIE A

4.2.1 - Concepção dos modelos

Na série A foram testadas doze vigas de betão armado de secção transversal em T conforme representado na Figura 4.2. Nesta figura estão ilustradas algumas das tarefas correspondentes à execução dos modelos de betão armado (após a montagem das armaduras; após a conveniente colocação das armaduras nas respectivas cofragens e preparação dos provetes para a caracterização do betão; betonagem das vigas com o pormenor da vibração; e o armazenamento das vigas). As vigas

continham, longitudinalmente na face traccionada, três varões de 25 mm de diâmetro ($3\phi 25$) e dois varões de 16 mm de diâmetro ($2\phi 16$) colocados de acordo com a disposição representada na Figura 4.3. As vigas tinham um vão livre de 2.25 m e vãos de corte a e b de 0.9 m e 1.35 m, respectivamente. O vão de corte a era igual a duas vezes e meia a altura útil da secção ($a/d = 2.5$). A relação entre o vão de corte b e o vão de corte a era de 1.5. De forma a evitar que a rotura por corte ocorresse no maior vão de corte b foram, aí colocados, estribos verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro afastados de 75 mm ($\phi 6@75\text{mm}$). As diferenças entre modelos ficaram unicamente restritas ao menor vão de corte a , concretamente, na forma como foi aí garantida a resistência ao esforço transversal (Figura 4.4).

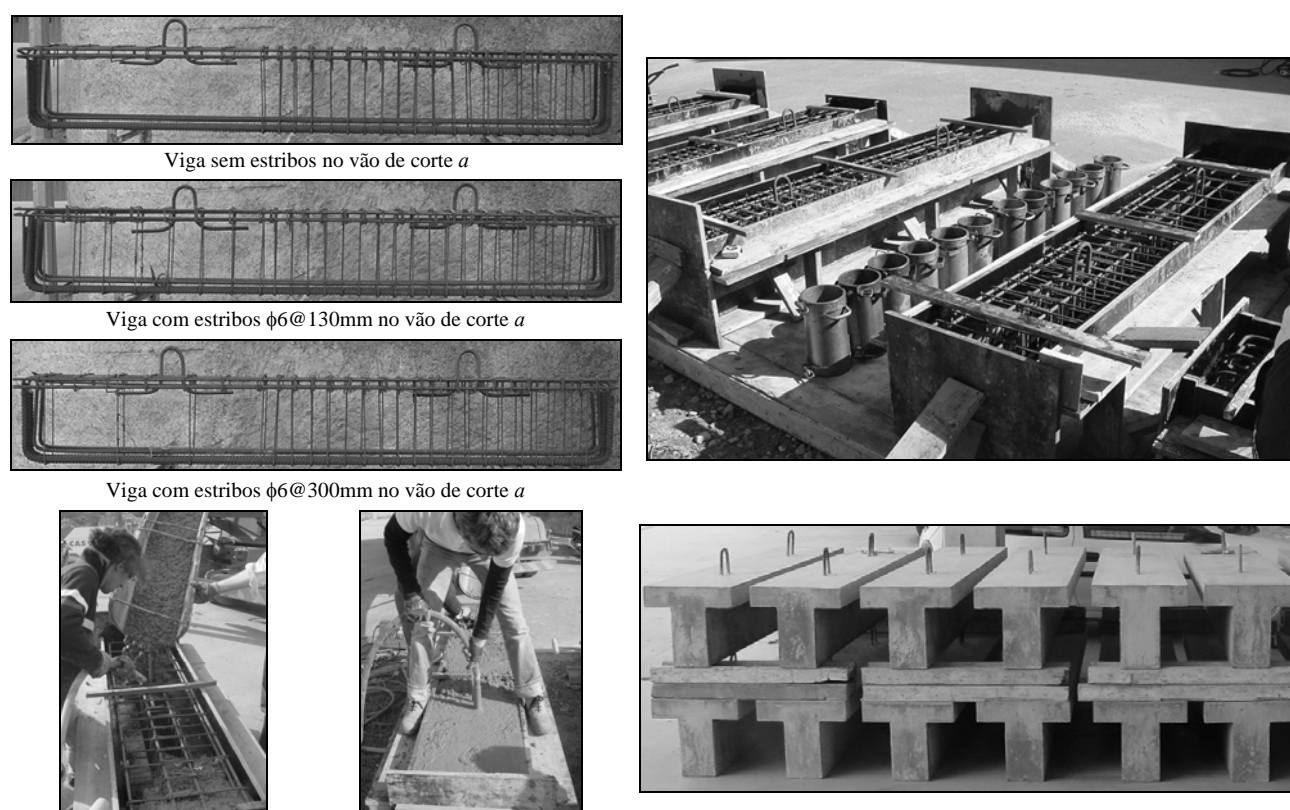


Figura 4.2 - Execução e armazenamento das vigas ensaiadas na série A.

O grupo de modelos ensaiados englobou: uma viga sem qualquer reforço ao corte (C-R-A); uma viga com estribos $\phi 6@300\text{mm}$ (viga 2S-R-A com ρ_{sw} de 0.10%); uma viga com estribos $\phi 6@130\text{mm}$ (viga 6S-R-A com ρ_{sw} de 0.24%); e nove vigas, contendo estribos $\phi 6@300\text{mm}$, reforçadas ao corte com distintas soluções em termos de distribuição dos laminados de CFRP. Concretamente, foram testadas três percentagens de CFRP (ρ_f) e, para cada umas destas percentagens, foram analisadas três formas de configuração de reforço ao corte em termos de orientação do CFRP relativamente à direcção do eixo da viga (laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60°). Tal como representado na Figura 4.3 o betão de recobrimento lateral dos estribos era de 22 mm. Os laminados utilizados nesta série de vigas tinham uma secção transversal de $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$.

De acordo com o que foi inicialmente pré-estabelecido, o pré-dimensionamento das vigas foi efectuado de forma a terem rotura por corte. A obtenção da quantidade de CFRP referente às vigas com o valor mais elevado de ρ_f , independentemente da orientação dos laminados, teve como princípio impor que as referidas vigas tivessem uma capacidade de carga máxima semelhante à da viga de betão armado com a maior percentagem de estribos de aço considerada ($\phi 6@130\text{mm}$ no vão de corte a). Para tal, foi estabelecido que o funcionamento dos laminados era similar ao dos estribos de aço, mas em vez de se considerar a tensão de cedência da armadura foi adoptada uma tensão no laminado correspondente a uma extensão de 5‰. Este valor corresponde a um compromisso entre o valor máximo recomendado pelo ACI Committe 440 (2002) para a técnica EBR (4‰) e o valor de 5.9‰ obtido em ensaios de arranque em flexão usando laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM (Sena-Cruz e Barros, 2004). Em relação ao pré-dimensionamento do reforço de CFRP das vigas do programa experimental do Capítulo 3, houve uma alteração do valor da extensão considerada para a definição da referida tensão no laminado (em vez de 4‰ foi considerado 5‰). Esta alteração esteve associada à introdução no critério de pré-dimensionamento dos reforços de CFRP de informação resultante dos ensaios experimentais de arranque em flexão usando laminados de CFRP, que anteriormente foram referidos.

O resultado do pré-dimensionamento traduziu-se nas seguintes soluções de reforço com CFRP para o menor vão de corte a : oito laminados em cada face da viga, para os casos dos reforços dispostos na vertical e com uma inclinação de 45° , e sete laminados em cada face da viga para o caso do reforço inclinado a 60° . Para as três orientações de CFRP analisadas (90° , 45° e 60°), as soluções de reforço referentes à percentagem mínima e intermédia de CFRP, por face do vão de corte a , foram as seguintes: três laminados para a percentagem mínima e cinco laminados para a percentagem intermédia. Quer para a percentagem mínima como para a percentagem intermédia de CFRP, o espaçamento dos laminados para cada uma das orientações foi obtido de forma a que as respectivas vigas tivessem uma capacidade máxima resistente semelhante. No anexo A desta dissertação é descrito, pormenorizadamente, o pré-dimensionamento das soluções de reforço ao corte com CFRP testadas na série A.

Na Tabela 4.2 e nas Figuras 4.3 e 4.4 apresentam-se as principais informações relativas às vigas da série A. Os laminados de CFRP foram distribuídos ao longo da linha AB, representada na Figura 4.3, tendo o ponto B sido obtido admitindo-se uma degradação da carga a 45° . Para evitar a ocorrência do destacamento do betão de recobrimento no apoio mais solicitado, este canto foi reforçado localmente com três camadas de manta de CFRP unidireccional, ficando as fibras dispostas segundo a direcção do eixo da viga (ver Figura 4.3).

Tabela 4.2 - Informações gerais sobre os modelos de vigas da série A.

Viga	Sistema de reforço ao corte no vão de corte a				
	Material	Quantidade	Porcentagem* [%]	Espaçamento [mm]	Ângulo [°]
C-R-A	-	-	-	-	-
2S-R-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
6S-R-A	Estribos de aço	6 ϕ 6 de dois ramos	0.24	130	90
2S-3LV-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x3 laminados (1.4x10 mm ²)	0.06	267	90
2S-5LV-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x10 mm ²)	0.10	160	90
2S-8LV-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x8 laminados (1.4x10 mm ²)	0.16	100	90
2S-3LI45-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x3 laminados (1.4x10 mm ²)	0.06	367	45
2S-5LI45-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x10 mm ²)	0.10	220	45
2S-8LI45-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x8 laminados (1.4x10 mm ²)	0.16	138	45
2S-3LI60-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x3 laminados (1.4x10 mm ²)	0.06	325	60
2S-5LI60-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x10 mm ²)	0.09	195	60
2S-7LI60-A	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x7 laminados (1.4x10 mm ²)	0.13	139	60

*A porcentagem de estribos de aço foi obtida usando a expressão (2.5) e a porcentagem de reforço de CFRP foi obtida usando a expressão (3.1).

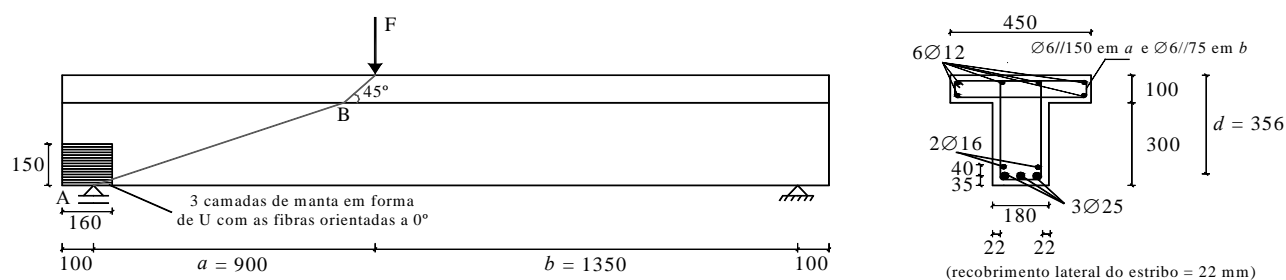


Figura 4.3 - Geometria das vigas da série A (dimensões em mm).

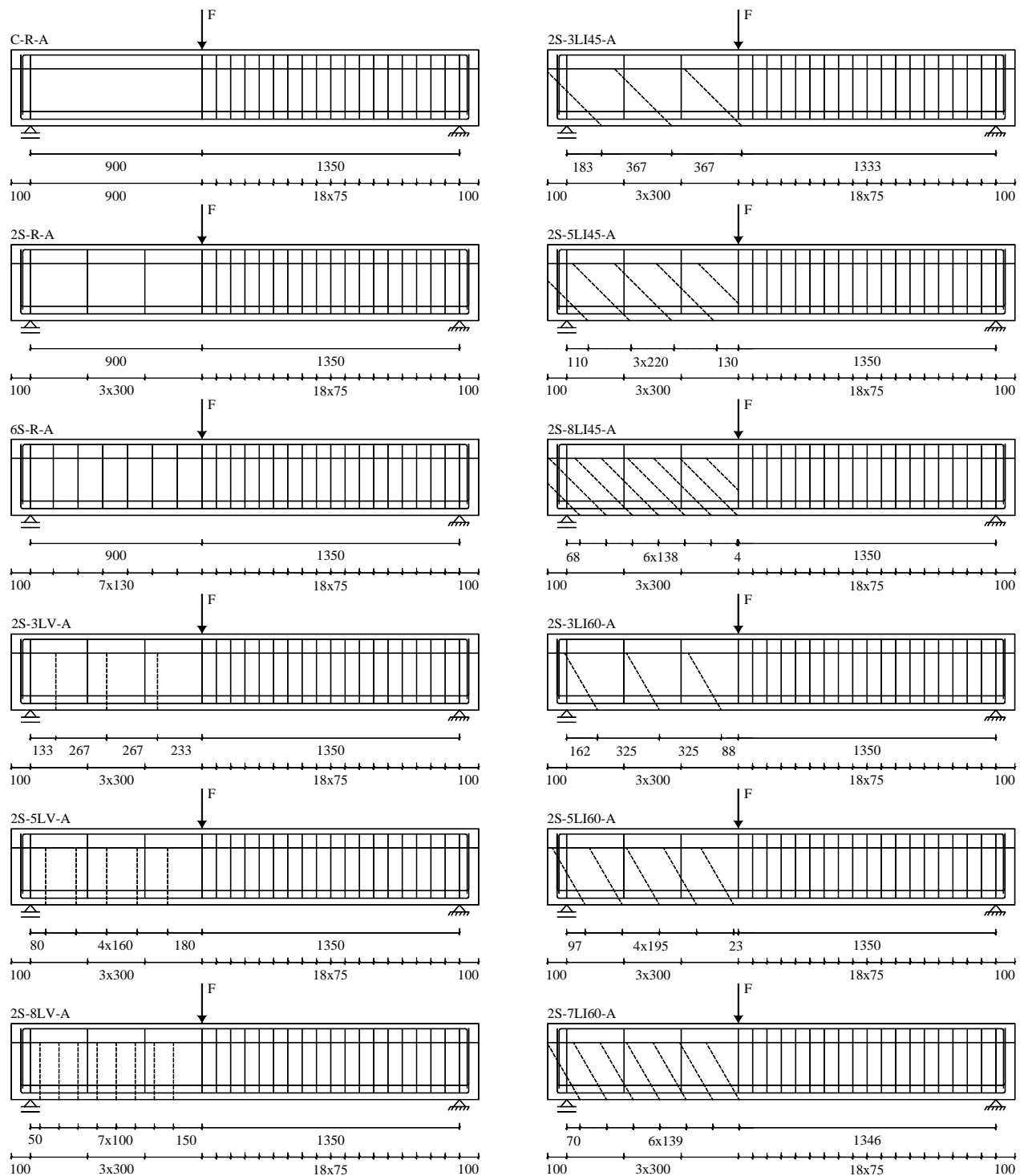


Figura 4.4 - Vigas ensaiadas da série A: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado).

4.2.2 - Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão das vigas, cuja composição se encontra registada no anexo B desta dissertação, foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas, à qual correspondeu uma idade média de 70 dias. Para tal, de acordo com a

EN 206-1 (2000) efectuaram-se ensaios de compressão uniaxial com cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 3.5). Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm, 12 mm, 16 mm e de 25 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial (Figura 3.5) efectuados seguindo o estipulado na EN 10002-1 (1990). A caracterização dos laminados de CFRP utilizados (S&P Laminates CFK 150/2000, S&P (2002)) foi efectuada por intermédio da realização de ensaios de tracção uniaxial (Figura 3.7) em seis provetes com as dimensões representadas na Figura 3.6, segundo a ISO 527-5 (1997). Na Tabela 4.3 estão registados os valores médios das propriedades mecânicas mais significativas do betão, do aço e dos laminados de CFRP obtidos experimentalmente. Os valores determinados em cada provete nos ensaios de caracterização dos referidos materiais estão compilados no anexo B. O adesivo utilizado para a fixação dos laminados, com a designação comercial de MBrace Resin 220 (Degussa, 2003), caracterizava-se por ter um tempo de trabalhabilidade de 60 minutos, do endurecimento total registar-se ao fim de três dias da sua aplicação e que esta deveria ser efectuada com temperaturas entre os 10°C e os 30°C (temperaturas do suporte e do material). A manta de CFRP unidireccional que foi utilizada para o reforço do canto inferior das vigas tinha a designação comercial de S&P C-Sheet 240 - 300 gr/m² (S&P, 2002). Para aplicação da manta de CFRP foi utilizado o primário MBrace Resin 50 (Degussa, 2003) e a resina MBrace Resin 55 (Degussa, 2003).

Tabela 4.3 - Principais propriedades do betão, do aço e dos laminados de CFRP referentes à série A.

Betão	Resistência à compressão				
	$f_{cm} = 26.0$ MPa (aos 28 dias)	$f_{cm} = 31.1$ MPa (aos 70 dias - idade à data do ensaio das vigas)			
	Resistência à tracção	$\phi 6$	$\phi 12$	$\phi 16$	$\phi 25$
Aço	f_{sym} (Tensão de cedência)	533 MPa	446 MPa	447 MPa	444 MPa
	f_{sum} (Tensão última)	592 MPa	564 MPa	561 MPa	574 MPa
Laminado de CFRP	Resistência à tracção	Módulo de Elasticidade		Extensão máxima*	
	$f_{fum} = 2952$ MPa (Tensão última)	$E_{fm} = 166.6$ GPa		$\varepsilon_{fum} = 17.7$ ‰	

* Valor obtido pela lei de Hooke.

4.2.3 - Sistema de ensaio e instrumentação dos modelos

As vigas foram submetidas a ensaios de flexão sob três pontos de carga até à sua rotura. Na Figura 4.5 apresenta-se o esquema do ensaio das vigas. Para instrumentação recorreu-se a uma célula de carga com uma capacidade máxima de carga de 500 kN, para medir a força aplicada durante o

ensaio, e a transdutores de deslocamentos (LVDT's) para medir os deslocamentos em determinadas secções da viga (secção de aplicação da carga; secções do vão de corte a afastadas $0.25a$, $0.5a$ e $0.75a$ da secção de aplicação da carga; secção a meio do vão de corte b ; secção de cada apoio). Os LVDT's ficaram suportados num sistema que evita o registo de deslocamentos parasitas ("Japanese Yoke"), tal como representado na Figura 4.6. Os ensaios foram controlados por intermédio do LVDT colocado na secção de aplicação da carga (controlo), tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 0.01 mm/s (ensaios sob controlo de deslocamentos).

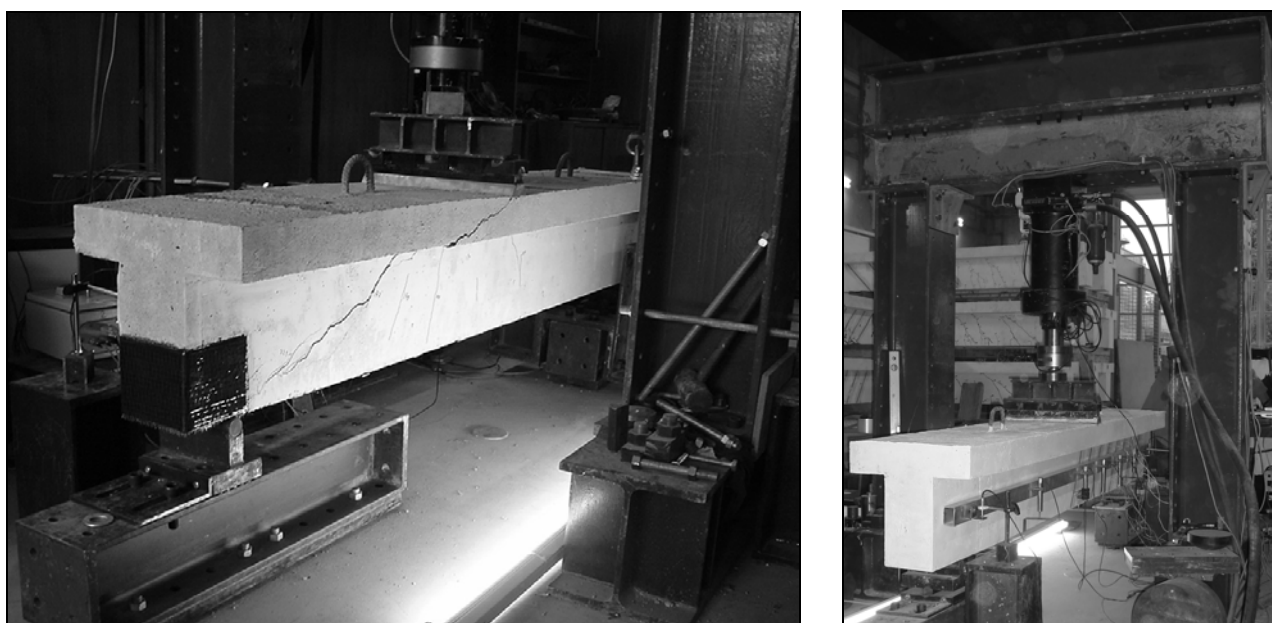


Figura 4.5 - Esquema geral do ensaio das vigas.

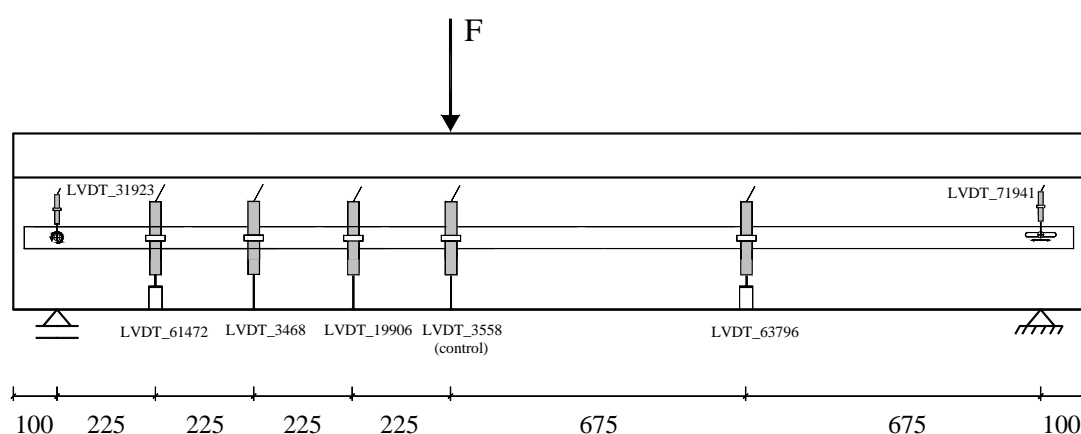


Figura 4.6 - Disposição dos transdutores de deslocamentos (LVDT's) (dimensões em mm).

As extensões no laminado de CFRP com maior probabilidade de ser o mais solicitado pela fenda de rotura de corte foram obtidas por intermédio de quatro extensómetros eléctricos (TML, 2004) colados de acordo com o esquema representado na Figura 4.7. De forma a minimizar os efeitos de perturbação, que a presença dos extensómetros poderia originar na ligação betão-adesivo-CFRP, foi

adoptada uma distribuição alternada dos extensómetros em termos da face do laminado onde foram colados (os extensómetros Ext.1 e Ext.3 foram colados numa face e os extensómetros Ext.2 e Ext.4 foram colados na outra face). Para avaliar o comportamento da armadura transversal no decorrer da formação da fenda de rotura de corte, o estribo mais próximo do apoio foi instrumentado com três extensómetros eléctricos de acordo com a configuração representada na Figura 4.8 (no caso da viga 6S-R-A o estribo instrumentado foi o quarto a contar da secção de aplicação da carga). A localização dos laminados e estribos instrumentados para cada uma das vigas ensaiadas na série A está representada na Figura 4.9. A face da alma da viga onde foi instalado o laminado instrumentado e o ramo do estribo contendo dois extensómetros foi a oposta à representada na Figura 4.9.

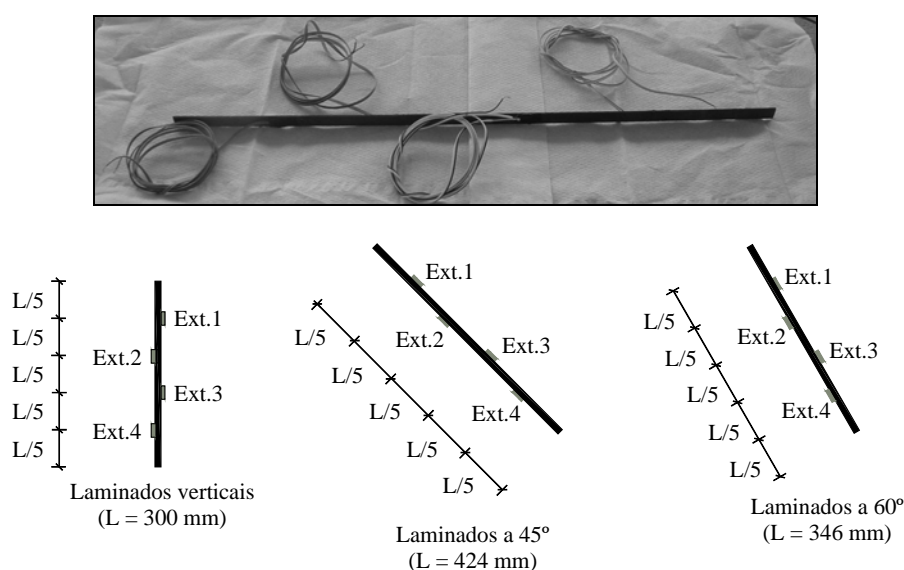


Figura 4.7 - Disposição dos quatro extensómetros aplicados no laminado de CFRP instrumentado ao longo do seu comprimento L (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4).



Figura 4.8 - Disposição dos três extensómetros num estribo de aço instrumentado.

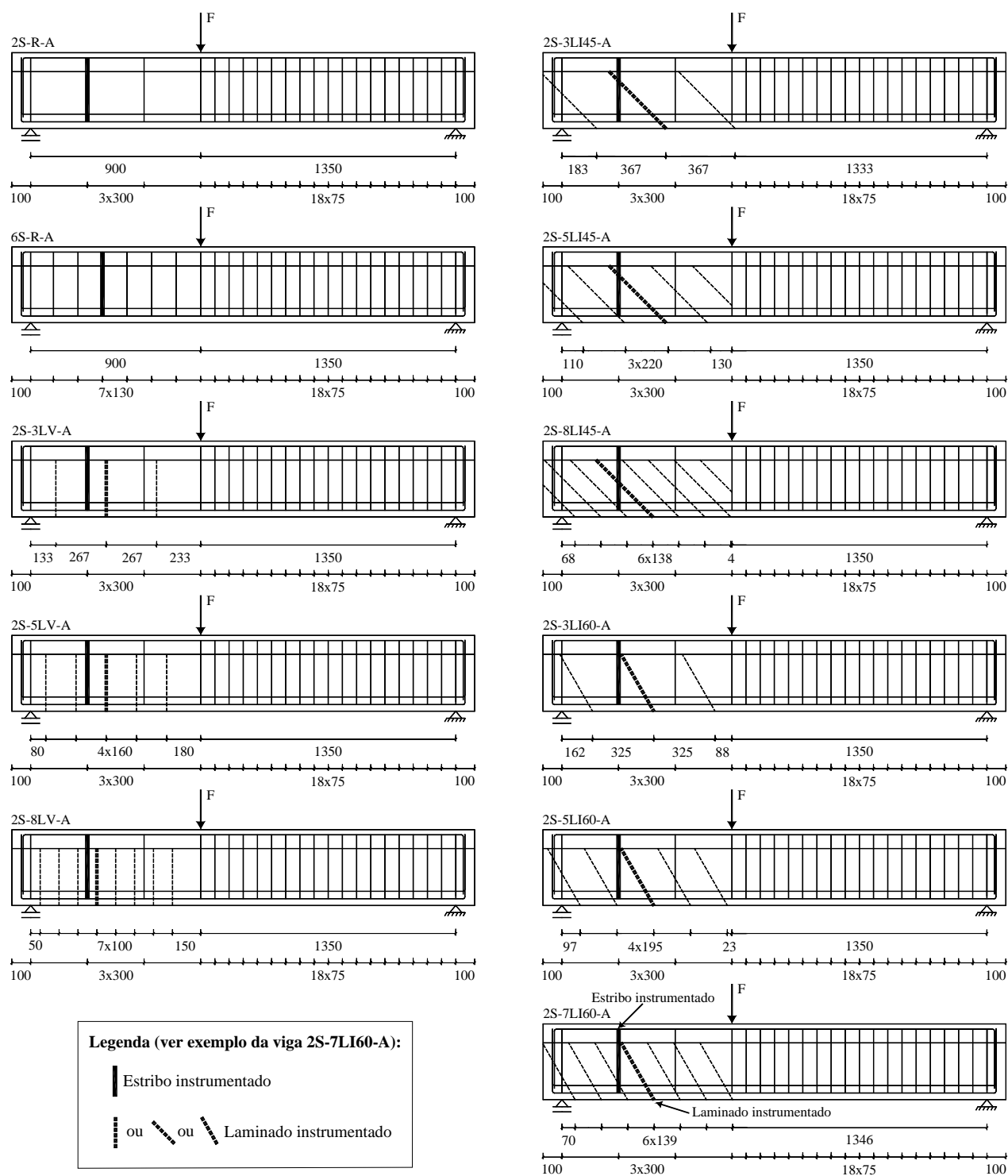


Figura 4.9 - Localização dos estribos e laminados instrumentados.

4.2.4 - Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos nos ensaios das vigas da série A serão apresentados e discutidos de forma a focar os seguintes aspectos:

- eficácia do reforço de CFRP em termos de capacidade de carga das vigas em serviço e na rotura;
- eficácia do reforço de CFRP em termos de capacidade deformacional das vigas na rotura;

- c) comportamento das vigas reforçadas ao longo do carregamento e respectivos modos de rotura;
- d) efeito da percentagem e da orientação dos laminados de CFRP na eficiência do reforço ao corte por intermédio da técnica NSM em termos de acréscimo de carga das vigas;
- e) desempenho do CFRP no que diz respeito ao nível de mobilização da sua capacidade máxima resistente.

4.2.4.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura

Na Tabela 4.4 apresenta-se o valor da força máxima obtida em cada uma das vigas ensaiadas (F_{max}). Atribuindo as designações F_{max}^{2S-R-A} e F_{max}^{6S-R-A} à carga máxima registada nas vigas de referência conteúdo, respectivamente, a menor (viga 2S-R-A: $\phi 6@300\text{mm}$) e a maior (viga 6S-R-A: $\phi 6@130\text{mm}$) percentagem de armadura transversal, determinaram-se os factores $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-A}$ e $F_{max} / F_{max}^{6S-R-A}$ indicados na Tabela 4.4 ($\Delta F_{max} = F_{max} - F_{max}^{2S-R-A}$). Nesta tabela também se apresenta o valor do parâmetro $(\Delta F / F^{2S-R-A})_{max}$, que corresponde ao valor máximo da relação entre o incremento de carga proporcionado pelo reforço de CFRP (ΔF), após a formação da fenda diagonal de corte na viga de referência 2S-R-A, e o valor da correspondente força na referida viga de referência F^{2S-R-A} (ver Figura 4.10.b). As flechas na secção de aplicação da carga correspondentes ao parâmetro $(\Delta F / F^{2S-R-A})_{max}$, designada por $u_{(\Delta F / F^{2S-R-A})_{max}}$, e à carga máxima ($u_{F_{max}}$) também estão registadas na Tabela 4.4. As respostas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga e a relação $\Delta F / F^{2S-R-A}$ vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas reforçadas com CFRP estão apresentadas na Figura 4.10. O primeiro tipo de resposta traduz o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente.

A análise dos resultados incluídos na Tabela 4.4 e dos gráficos da Figura 4.10 permite constatar que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da sua percentagem e orientação, proporcionou um aumento da capacidade de carga das vigas. A presença do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal tornou-se evidente a partir do momento correspondente à formação da fenda diagonal de corte na viga de referência 2S-R-A (ver Figura 4.10.a). Com efeito, a quebra momentânea da capacidade de carga que se verificou na curva de comportamento da viga 2S-R-A, para uma carga de cerca de 170 kN e uma flecha na secção de aplicação da carga de 1.5 mm, não ocorreu nas vigas reforçadas com CFRP, o que permite constatar que o CFRP ofereceu

resistência efectiva à abertura das fendas de corte que os interceptaram, proporcionando um aumento de rigidez, conforme se pode verificar da análise da Figura 4.10.

As soluções com a menor percentagem de CFRP (maior espaçamento entre laminados consecutivos) foram as que conduziram a menores ganhos de capacidade de carga máxima: 0.3%, 4.1% e 18.7%, respectivamente, para a solução de laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60°. No entanto, em termos do parâmetro $\left(\Delta F / F^{2S-R-A}\right)_{max}$ a contribuição das soluções de reforço das vigas 2S-3LV-A e 2S-3LI45-A (13.4% e 8.7%, respectivamente) foi maior do que em termos de contributo para o aumento da capacidade máxima de carga (para a viga 2S-3LI60-A verificou-se que $\left(\Delta F / F^{2S-R-A}\right)_{max}=19.6\%$), indicando que as referidas duas soluções garantiram um apreciável contributo para o aumento da rigidez da viga de referência.

Em relação às soluções de CFRP correspondentes ao valor intermédio de ρ_f , o reforço com laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° garantiu, tomando como base de comparação a carga máxima da viga 2S-R-A, um aumento de 13.3%, 21.9% e 24.4%, respectivamente. Para esta gama de ρ_f , apenas as vigas 2S-5LV-A e 2S-5LI45-A tiveram valores de $\left(\Delta F / F^{2S-R-A}\right)_{max}$ superiores ao aumento registado em termos de carga máxima (17.3% e 22.1%, respectivamente).

Tabela 4.4 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série A).

Viga	F_{max} [kN]	$\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-A}$ [%]	$F_{max} / F_{max}^{6S-R-A}$	$\left(\Delta F / F^{2S-R-A}\right)_{max}$ [%]	$u_{F_{max}}$ [mm]	$u_{\left(\Delta F / F^{2S-R-A}\right)_{max}}$ [mm]
C-R-A	243	-	0.59	-	5.18	-
2S-R-A	315	0.0	0.77	0.0	5.97	-
6S-R-A	410	30.2	1.00	30.2	7.40	7.40
2S-3LV-A	316	0.3	0.77	13.4	4.94	3.84
2S-5LV-A	357	13.3	0.87	17.3	7.11	5.05
2S-8LV-A	396	25.7	0.97	26.5	6.22	5.10
2S-3LI45-A	328	4.1	0.80	8.7	5.73	4.13
2S-5LI45-A	384	21.9	0.94	22.1	5.92	5.79
2S-8LI45-A	382	21.3	0.93	28.2	5.07	4.80
2S-3LI60-A	374	18.7	0.91	19.6	5.78	5.76
2S-5LI60-A	392	24.4	0.96	24.4	5.93	5.93
2S-7LI60-A	406	28.9	0.99	33.0	5.86	5.04

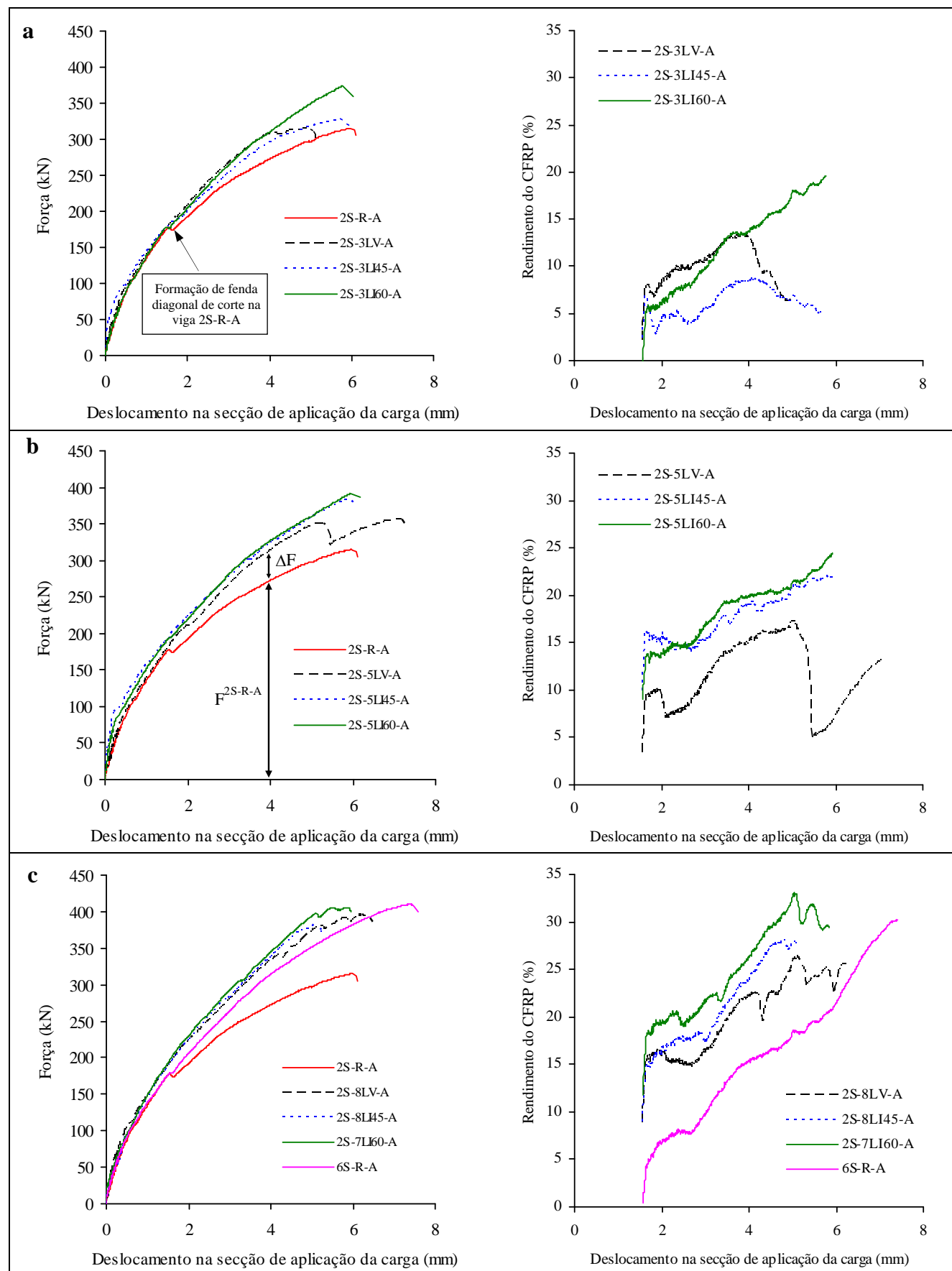


Figura 4.10 - Comportamento das vigas ensaiadas da série A: a) percentagem mínima de CFRP; b) percentagem intermédia de CFRP; c) percentagem máxima de CFRP.

Das vigas reforçadas com o maior valor de ρ_f , a solução com laminados inclinados a 60°, tal como aconteceu nas restantes percentagens, foi a mais eficaz, garantindo, relativamente à carga máxima da viga 2S-R-SA, um aumento, em termos de capacidade de carga máxima, de 28.9%, enquanto as soluções com laminados verticais e inclinados a 45° garantiram um aumento de 25.7% e 21.3%, respectivamente. Em termos de $(\Delta F/F^{2S-R-A})_{max}$ verificou-se que as soluções de laminados a 60°, 45° e 90° proporcionaram valores de 33.0%, 28.2% e 26.5%, respectivamente.

Conforme foi referido anteriormente, as vigas reforçadas com a maior percentagem de CFRP foram concebidas de forma a terem uma capacidade de carga máxima semelhante à da viga de referência 6S-R-A. Os resultados demonstraram que esse objectivo foi, de um modo geral, atingido uma vez que a capacidade de carga máxima da viga reforçada com a maior percentagem de laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° foi, respectivamente, 97%, 93% e 99% da atingida pela viga 6S-R-A. Comparando as curvas de comportamento das vigas reforçadas com o maior valor de ρ_f com o da viga “equivalente” em termos de betão armado (6S-R-A), é possível constatar o melhor comportamento das vigas com CFRP após o momento correspondente à formação da fenda diagonal de corte na viga 2S-R-A. Com efeito, o número de laminados aplicados conduziu a um aumento significativo de rigidez, que não foi tão evidente no caso da viga 6S-R-A.

De um modo geral, é possível verificar que a deformação das vigas na rotura ($u_{F_{max}}$) não foi muito sensível à presença do reforço ao corte de CFRP. O valor médio de $u_{F_{max}}$ foi de 5.84 mm para as vigas com CFRP e de 5.97 mm para a viga 2S-R-A. As soluções de reforço referentes às vigas 2S-3LV-A e 2S-8LI45-A foram as que proporcionaram valores mais baixos de $u_{F_{max}}$, 4.94 mm e 5.07 mm, respectivamente. A viga 2S-5LV-A foi a que registou o maior valor de deformação na rotura (7.11 mm). Por outro lado, é possível constatar que, independentemente da orientação do reforço de CFRP, os modelos com a percentagem intermédia de laminados foram os que tiveram maiores deformações na rotura. Comparando directamente os modelos que continham a maior percentagem de reforço de CFRP (vigas 2S-8LV-A, 2S-8LI45-A e 2S-7LI60-A) com o modelo “equivalente” em betão armado (viga 6S-R-A) é possível verificar que este apresentou uma capacidade deformacional na rotura 30% superior. No que diz respeito à flecha na secção de aplicação da carga referente ao parâmetro $(\Delta F/F^{2S-R-A})_{max}$ verificou-se que, para as vigas com CFRP, o seu valor em termos médios (5.05 mm) foi cerca de 86% do valor médio de $u_{F_{max}}$, o que corresponde a 85% do valor de $u_{F_{max}}$ da viga de referência sem reforço de CFRP (viga 2S-R-A).

4.2.4.2 - Modos de rotura

Como era esperado, a rotura por corte acabou por se registar em todas as vigas ensaiadas, tendo ocorrido no menor dos vãos de corte a . Nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam-se pormenores da zona de rotura das vigas de referência (apenas betão armado) e das vigas com a percentagem ρ_f mínima, intermédia e máxima, respectivamente. Nas referidas figuras as linhas verticais correspondem à localização dos estribos de aço e os círculos à posição das secções onde ocorreu a rotura dos estribos durante o ensaio.

A viga C-R-A atingiu a sua capacidade máxima com a abertura excessiva da fenda diagonal de corte que se formou ao longo do ensaio. Nas vigas 2S-R-A e 6S-R-A a capacidade máxima de carga foi atingida quando ocorreu a rotura de um dos estribos que atravessavam a fenda de rotura de corte (ver Figura 4.11). A rotura dos restantes estribos deu-se após as vigas terem atingido a sua carga máxima.

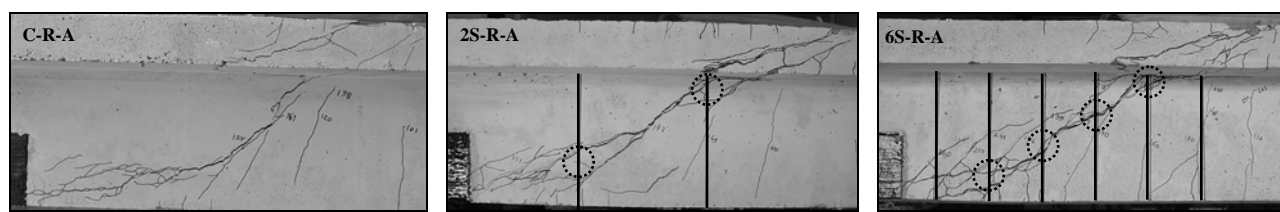


Figura 4.11 - Modos de rotura das vigas da série A sem reforço ao corte com CFRP.

O modo de rotura típico observado nas vigas com a menor percentagem de CFRP foi a cedência do laminado central, com destacamento de betão adjacente ao CFRP (ver Figura 4.17.a). O melhor desempenho da solução de laminados a 60° esteve associado à circunstância da única fenda diagonal de corte que ocorreu ter sido interceptada por dois estribos e um laminado (Figura 4.12). Tal facto não ocorreu nas vigas 2S-3LV-A e 2S-3LI45-A, onde se formaram duas fendas diagonais de corte bastante activas, cada uma interceptada por um estribo e um laminado. No caso da viga com o reforço inclinado a 45° o laminado central foi activado de forma significativa pelas duas fendas de corte anteriormente referidas.

Na viga 2S-5LV-A, por volta dos 2 mm de deformação na secção de aplicação da carga, ocorreu uma ligeira quebra de rigidez (Figura 4.10-b) em virtude da formação de fendas de corte. Devido à presença dos laminados, a rigidez da viga foi recuperada e a capacidade resistente aumentou até aos 350 kN, altura em que ocorreu uma quebra de carga devido ao deslizamento do laminado central (parte inferior). Após a referida quebra de carga, dos 350 kN para os 315 kN, a capacidade resistente da viga voltou a aumentar até aos 357 kN, altura em que se deu a rotura de um dos estribos de aço. A carga máxima da viga 2S-5LI45-A foi atingida quando ocorreu o destacamento da parte inferior do segundo laminado a contar do apoio da viga, a que se seguiu o destacamento do laminado central

(parte superior). A capacidade de carga da viga 2S-5LI60-A aumentou até ao momento em que aconteceu o destacamento do laminado central. Para estas duas últimas vigas a rotura dos dois estribos presentes no vão de corte reforçado com CFRP ocorreu posteriormente ao momento em que as vigas atingiram a sua capacidade máxima de carga. Tal como aconteceu nas vigas com a percentagem mínima de CFRP, os laminados que cederam nas vigas 2S-5LI45-A e 2S-5LI60-A, e que originaram a rotura das vigas, continham betão adjacente. Este facto leva a concluir que a resistência do betão tem um papel fundamental no desempenho do reforço de CFRP. Esta questão será mais á frente desenvolvida tendo como base mais resultados experimentais. Tal como ocorreu para a menor percentagem de CFRP, a solução de laminados a 60° foi mais eficaz do que a solução de laminados a 45°, pois garantiu uma distribuição dos laminados de CFRP, tendo em conta a posição dos estribos de aço, mais homogénea, além do facto dos laminados se encontrarem mais próximos da ortogonalidade à fenda de rotura de corte.

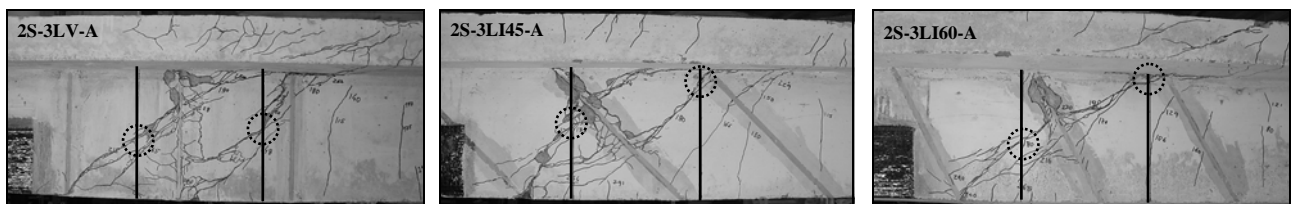


Figura 4.12 - Modos de rotura das vigas da série A com a percentagem mínima de CFRP.

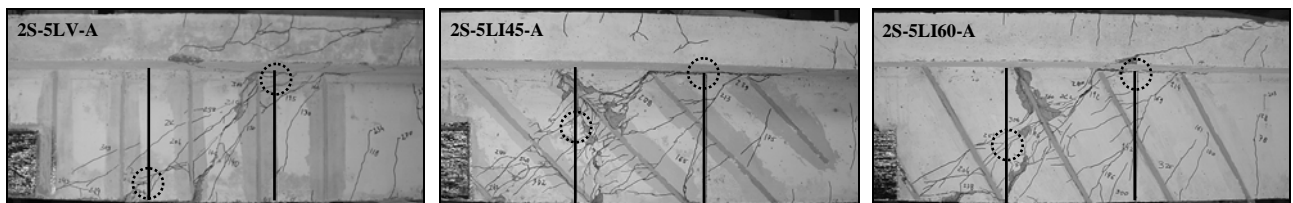


Figura 4.13 - Modos de rotura das vigas da série A com a percentagem intermédia de CFRP.

A carga máxima da viga 2S-8LV-A foi atingida com o deslizamento da parte inferior do quinto laminado (comprimento de amarração de 11 cm) a contar da secção de aplicação da carga (laminado instrumentado - ver Figura 4.17.b). Previamente a este facto, na face oposta (a representada na Figura 4.14) registou-se o destacamento do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga (comprimento de amarração de 6 cm). Após a carga máxima os dois estribos localizados no menor dos vãos de corte atingiram a rotura. A capacidade máxima resistente da viga 2S-8LI45-A foi alcançada quando ocorreu a cedência da parte superior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga, seguido do destacamento, também da parte superior, do laminado situado imediatamente ao lado do que se destacou em primeiro lugar (quinto laminado a contar da secção de aplicação da carga). A proximidade dos referidos laminados fez com que, associado aos respectivos destacamentos, houvesse a intersecção das correspondentes linhas de rotura motivando o

destacamento de uma “parede de betão contendo CFRP”. Este tipo de modo de rotura será mais à frente analisado. Numa fase posterior à viga 2S-8LI45-A ter atingido a carga máxima registou-se a rotura dos dois estribos localizados no menor dos vãos de corte. A capacidade de carga da viga 2S-7LI60-A aumentou até ao momento em que aconteceu a cedência da parte inferior do laminado central. De seguida deu-se o destacamento do terceiro laminado a contar da secção da carga (parte superior). Nesta viga apenas o estribo mais afastado do apoio atingiu a rotura. De um modo geral, nas vigas com a maior percentagem de CFRP a fenda de rotura de corte não era visível no final do ensaio. Contudo, após a realização do ensaio procedeu-se à remoção do betão que se destacou e foi possível verificar a existência de uma banda de fendilhação de corte que originou a rotura das vigas (ver Figura 4.15). A banda de fendilhação registada na viga 2S-7LI60-A, associada à distribuição do reforço de CFRP e à posição dos estribos de aço, justificam o melhor rendimento da solução de laminados a 60° em relação à de laminados a 45°.

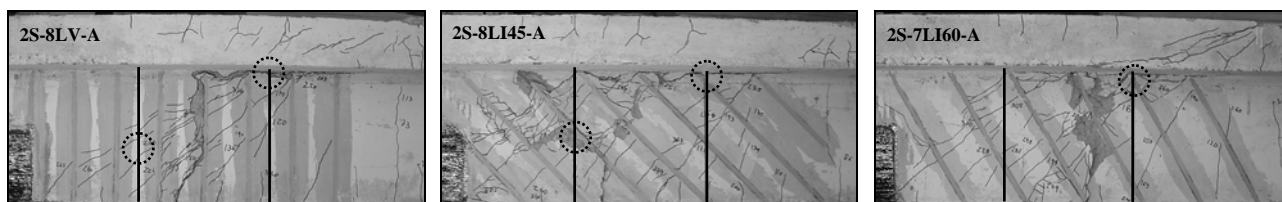


Figura 4.14 - Modos de rotura das vigas da série A com a percentagem máxima de CFRP.

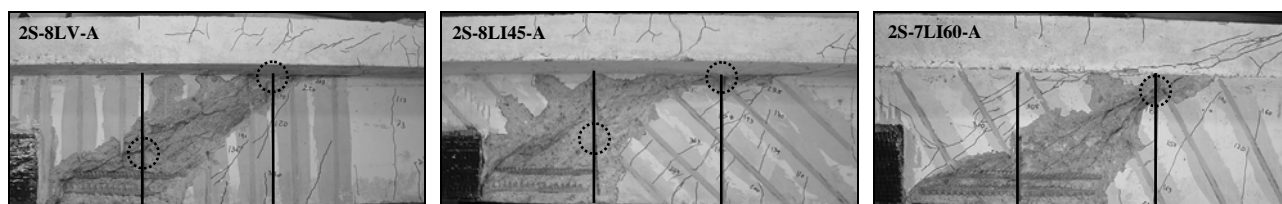


Figura 4.15 - Pormenorização da zona de rotura das vigas da série A com a percentagem máxima de CFRP.

O padrão de fendilhação instalado nas vigas reforçadas com CFRP dependeu da percentagem de reforço, tornando-se mais difuso à medida que a percentagem de CFRP aumenta. Quando esta percentagem é significativa, o número elevado de laminados e o padrão de fendilhação instalado podem originar pequenos comprimentos de aderência do CFRP. Este facto pode promover uma menor eficiência do reforço de CFRP uma vez que, com menores comprimentos de aderência a cedência do laminado é mais prematura. Além disso, o menor espaçamento dos CFRP pode provocar um efeito de grupo que origina o aparecimento de uma camada de betão que se destaca, conforme pode se observou no caso da viga 2S-8LI45-A. Este facto indicia que, para uma determinada solução de reforço ao corte com CFRP, deve existir um limite mínimo para o espaçamento dos laminados a partir do qual não há mais contributo na capacidade resistente da viga em termos de esforço transversal. Na Figura 4.16 apresenta-se o aspecto final das vigas 2S-3LI45-A, 2S-5LI45-A e 2S-

8LI45-A onde é possível verificar o efeito da percentagem de CFRP no modo de rotura das vigas (ver também Figura 4.17.c).

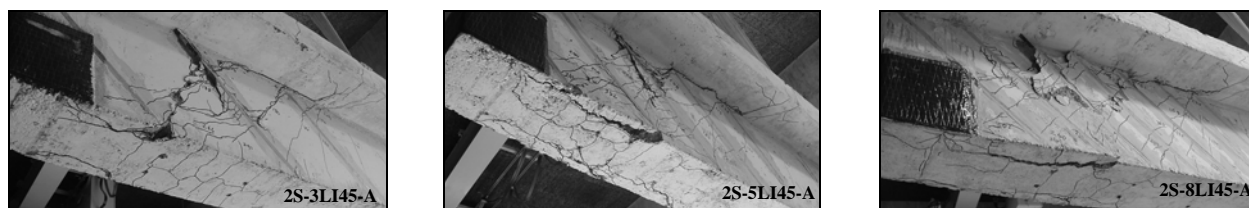
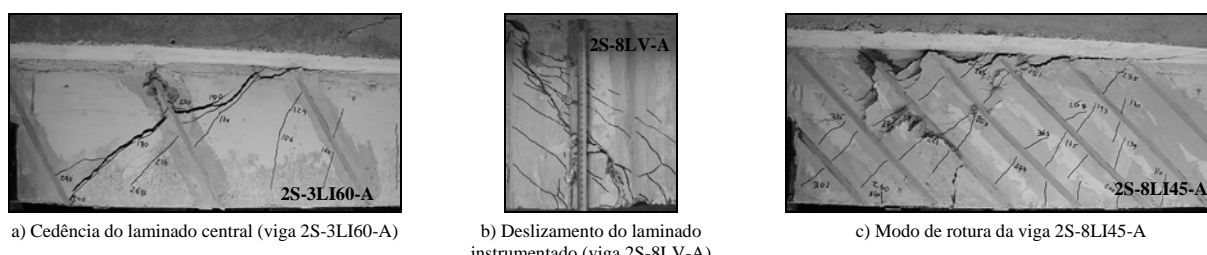


Figura 4.16 - Efeito da percentagem de CFRP no modo de rotura das vigas.



a) Cedência do laminado central (viga 2S-3LI60-A)

b) Deslizamento do laminado instrumentado (viga 2S-8LV-A)

c) Modo de rotura da viga 2S-8LI45-A

Figura 4.17 - Alguns pormenores das vigas da série A.

Na análise dos modos de rotura observados nas vigas reforçadas com laminados de CFRP destaca-se um aspecto, já anteriormente referido, que foi a importância que o betão apresenta no desempenho da técnica de reforço em análise. A eficácia do reforço de CFRP está directamente associada à qualidade do betão. Este facto permite concluir que, se na série de vigas que foram ensaiadas o betão apresentasse melhor qualidade, o rendimento do reforço de CFRP seria superior, o que proporcionaria maiores aumentos quer de capacidade de carga como de capacidade deformacional das vigas reforçadas.

4.2.4.3 - Efeito da percentagem e da orientação do CFRP

Nesta secção será efectuada a análise da influência da percentagem e da orientação do CFRP na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP quando aplicada no reforço ao corte de vigas T de betão armado. Para tal, na Figura 4.18 apresenta-se, para cada uma das vigas com CFRP, na primeira coluna o valor do acréscimo de carga máxima proporcionado pelo reforço ($\Delta F_{max}/F_{max}^{2S-R-A}$) e na segunda coluna o valor do parâmetro $(\Delta F/F_{max}^{2S-R-A})_{max}$. Complementarmente, na Figura 4.19 apresenta-se a relação entre a percentagem de CFRP e a eficácia do reforço em termos de acréscimo de carga máxima ($\Delta F_{max}/F_{max}^{2S-R-A}$) e em termos do parâmetro $(\Delta F/F_{max}^{2S-R-A})_{max}$.

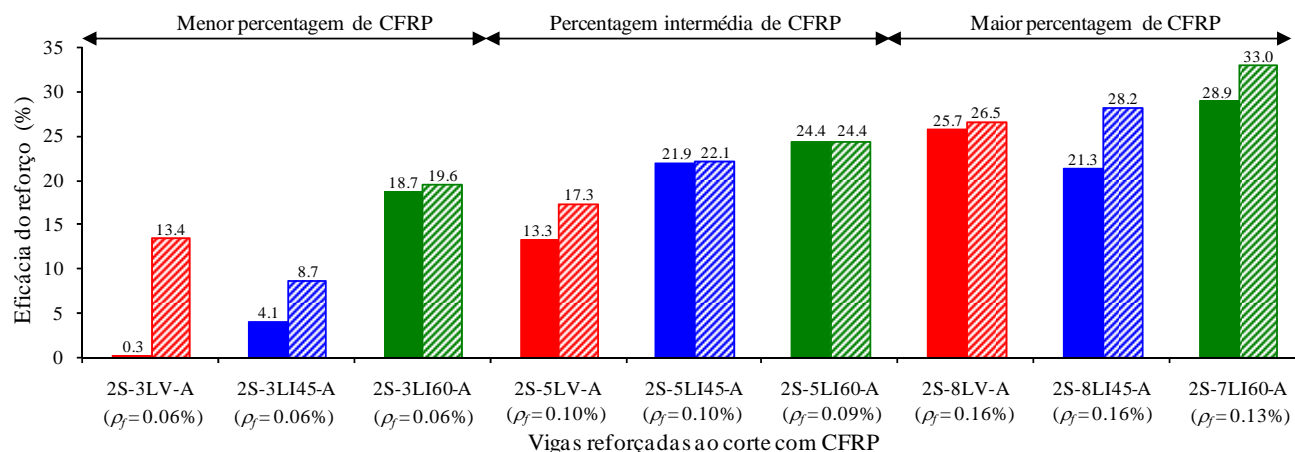


Figura 4.18 - Eficácia do reforço de CFRP nos modelos ensaiados da série A.

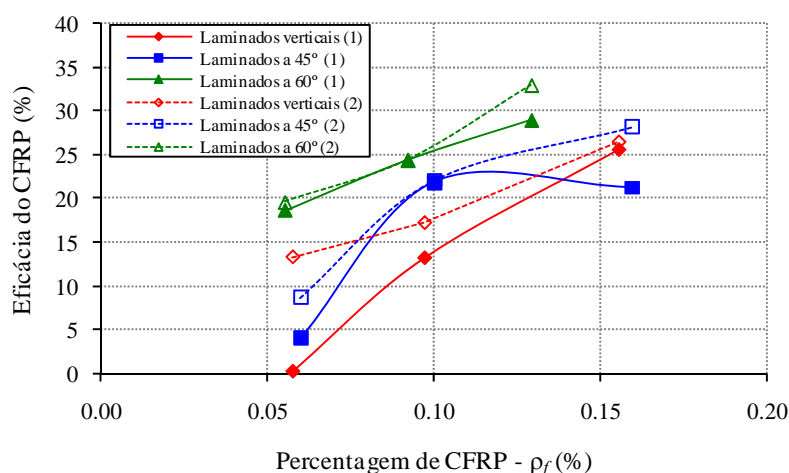


Figura 4.19 - Eficácia do reforço vs percentagem de CFRP: (1) em termos de $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-A}$ e (2) em termos de $(\Delta F / F^{2S-R-A})_{max}$.

A análise das Figura 4.18 e 4.19 permite constatar que, independentemente da percentagem de CFRP, a solução com laminados a 60° foi a mais eficaz das três orientações testadas. Além disso, é possível verificar que, de um modo geral, as soluções com laminados a 45° tiveram melhor desempenho que as soluções de laminados verticais. A maior eficácia das soluções de laminados inclinados esteve directamente associada à inclinação da fenda de rotura de corte (aproximadamente ortogonal aos laminados inclinados). Além disso, de um modo geral, as soluções de laminados inclinados, quando comparadas com as de laminados verticais, destacam-se por potenciarem maiores comprimentos de amarração do CFRP, ou seja, melhores condições de aderência que proporcionam um melhor rendimento do CFRP.

Os ganhos de resistência proporcionados pelos CFRP adoptados ($\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-A}$ e $(\Delta F / F^{2S-R-A})_{max}$) foram, de um modo geral, proporcionais à percentagem de reforço (ρ_f), ou seja, a um aumento da

percentagem ρ_f correspondeu um maior aumento de capacidade de carga da viga (a única excepção foi o caso da viga 2S-8LI45-A ($\rho_f = 0.16\%$) que teve uma capacidade de carga máxima ligeiramente inferior à da viga 2S-5LI45-A ($\rho_f = 0.1\%$)). O modo de rotura que se verificou na viga 2S-8LI45-A esteve na origem desta ocorrência.

Na análise das Figuras 4.18 e 4.19 destaca-se ainda o baixo contributo em termos de $(\Delta F / F^{2S-R})_{max}$ das soluções referentes à menor percentagem de CFRP com os laminados na vertical e com os laminados inclinados a 45° . Um dado adicional às considerações que já foram feitas sobre o comportamento das vigas 2S-3LV-A e 2S-3LI45-A, e que de certa forma também justifica o baixo rendimento destas soluções de reforço em termos do acréscimo de carga máxima que proporcionaram em relação à da viga de referência, está relacionado com o facto de se ter registado nas referidas vigas uma contribuição da armadura transversal, face à fenda de rotura de corte, menor do que a verificada no caso da viga sem CFRP (ver a viga 2S-R-A na Figura 4.11 e as vigas 2S-3LV-A, 2S-3LI45-A e 2S-3LI60-A na Figura 4.12). Comparando as vigas 2S-3LV-A e 2S-3LI45-A com a viga 2S-3LI60-A é possível verificar que nesta o desempenho da armadura transversal face à fenda de rotura de corte foi similar ao que ocorreu na viga de referência 2S-R-A, o que não se verificou quer na viga 2S-3LV-A como na viga 2S-3LI45-A. Este assunto será retomado com mais detalhe no Capítulo 5 desta dissertação.

4.2.4.4 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais

Na Figura 4.20 apresenta-se a relação entre ε_{CFRP}^{max} e ρ_f (linha a traço cheio) e entre $(\varepsilon_{CFRP}^{max})_{med}$ e ρ_f (linha a tracejado), em que ε_{CFRP}^{max} é o valor da extensão máxima no CFRP, que foi registada nos extensómetros do laminado instrumentado (ver Figura 4.9) antes das vigas atingirem a rotura, e $(\varepsilon_{CFRP}^{max})_{med}$ é a média dos valores da extensometria no instante em que se verificou o valor de ε_{CFRP}^{max} . Para cada uma das vigas reforçadas da série A, na Tabela 4.5, além das extensões anteriormente referidas, encontram-se os valores registados nos quatro extensómetros colados no CFRP, para a carga máxima (F_{max}). Para os casos em que a extensão máxima no CFRP se verificou para uma carga inferior a F_{max} , também se indica, entre parênteses curvos, os valores registados nos extensómetros nesse instante.

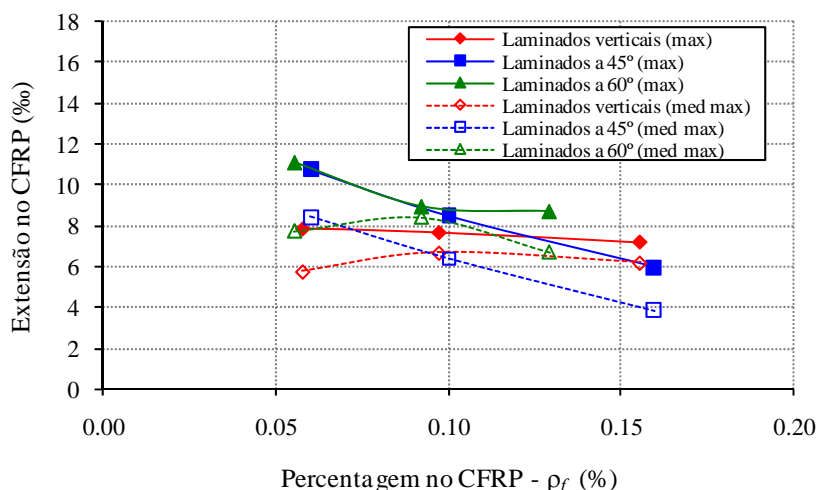


Figura 4.20 - Extensões no CFRP vs percentagem de CFRP.

Tabela 4.5 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP (série A).

Viga	$\epsilon_{Ext.1}$ [‰]	$\epsilon_{Ext.2}$ [‰]	$\epsilon_{Ext.3}$ [‰]	$\epsilon_{Ext.4}$ [‰]	ϵ_{CFRP}^{max} [‰]	$(\epsilon_{CFRP}^{max})_{med}$ [‰]
2S-3LV-A	-	7.84	3.67	-	7.84	5.76
2S-5LV-A*	-	7.65	6.26	6.12	7.65	6.68
2S-8LV-A**	6.65 (6.68)	6.94 (7.17)	6.91 (5.44)	4.26 (3.06)	7.17	6.19 (5.59)
2S-3LI45-A	8.86	8.83	10.76	5.20	10.76	8.41
2S-5LI45-A	7.58	8.47	5.67	3.83	8.47	6.39
2S-8LI45-A	2.60	5.95	4.76	2.15	5.95	3.87
2S-3LI60-A**	-	11.08 (11.11)	9.75 (9.72)	2.28 (2.16)	11.11	7.70 (7.66)
2S-5LI60-A**	7.41 (7.74)	8.87 (8.96)	8.36 (8.44)	-	8.96	8.21 (8.38)
2S-7LI60-A	4.70 (6.57)	8.47 (8.72)	7.31 (7.14)	4.59 (4.23)	8.72	6.27 (6.67)

* Os valores das extensões referem-se à carga imediatamente antes da cedência do laminado instrumentado.

** Os valores das extensões entre parênteses referem-se à carga para a qual ocorreu a máxima extensão no laminado instrumentado antes da carga máxima (391 kN na viga 2S-8LV-A, 372 kN na viga 2S-3LI60-A, 389 kN na viga 2S-5LI60-A e 405 kN na viga 2S-7LI60-A).

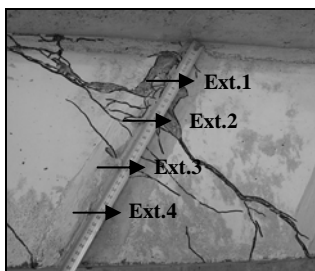
Da análise dos dados da Tabela 4.5 é possível verificar que o valor de (ϵ_{CFRP}^{max}) variou entre os 6.0‰ na viga 2S-8LI45-A e os 11.1‰ na viga 2S-3LI60-A. Em termos de $(\epsilon_{CFRP}^{max})_{med}$ a variação foi entre os 3.9‰ na viga 2S-8LI45-A e os 8.4‰ na viga 2S-3LI45-A. A média dos valores de ϵ_{CFRP}^{max} e de $(\epsilon_{CFRP}^{max})_{med}$ das vigas ensaiadas foi de 8.5‰ e 6.6‰, respectivamente.

Nas vigas com a maior percentagem de laminados as extensões máximas no CFRP foram mais baixas que as verificadas nas vigas com a menor percentagem de CFRP (Figura 4.20). Nestas, o padrão de fendilhação foi mais discreto, tendo o menor número laminados originado, necessariamente, uma concentração de extensões em determinadas secções do laminado. Além disso, o modo de rotura por

cedência de um laminado isolado (sem o efeito de grupo associado a soluções com laminados adjacentes próximos) potencia a existência de valores mais elevados da extensão no CFRP. O facto do padrão de fendilhação ser mais difuso nas vigas com maior percentagem de reforço fez com que o CFRP fosse atravessado por um maior número de fendas, potenciando menores comprimentos de amarração e uma maior fragilização das condições de aderência do CFRP. Estas ocorrências são potenciadoras de uma menor mobilização do CFRP para as maiores percentagens de reforço.

Em termos de orientação do CFRP, a solução com laminados inclinados a 60° foi a que mais mobilizou a capacidade resistente do material de reforço. Com efeito, o valor médio de ε_{CFRP}^{max} referente às três soluções com o CFRP inclinado a 60° foi de 9.6‰, ou seja, 54% da extensão máxima obtida nos ensaios de tracção directa dos laminados (17.7‰ - Tabela 4.3). As soluções de laminados verticais e de laminados inclinados a 45° conduziram, em termos médios, a uma mobilização do reforço de cerca de 43% (extensão de 7.6‰) e 47% (extensão de 8.4‰), respectivamente.

Tabela 4.6 - Variação das extensões no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-3LI60-A (valores das extensões em ‰).

Descrição							
Reforço ao corte com CFRP constituído por três laminados inclinados a 60° em cada face da viga.							
A carga máxima atingida foi de $F_{max} = 374$ kN imediatamente antes da cedência do laminado central (parte superior - menor comprimento de amarração do laminado relativamente à fenda de rotura de corte).							
							
CFRP	Ext.	F = 200 kN	F = 250 kN	F = 300 kN	F = 350 kN	F = 372 kN	F = 374 kN
	1 ^a	-	-	-	-	-	-
	2	3.2	5.7	7.8	10.0	11.1	11.1
	3	1.3	2.0	4.8	8.0	9.7	9.8
	4	0.1	0.3	0.6	1.3	2.2	2.3
Estribo de aço	Ext.	F = 200 kN	F = 250 kN	F = 300 kN	F = 350 kN	F = 372 kN	F = 374 kN
	1 ^b	0.6 (1.3)	1.4 (3.1)	1.9 (3.4)	2.0	2.1	2.1
	2 ^b	1.9 (1.9)	3.4 (12.3)	9.2 (5.3)	4.6	3.8	3.8
	3 ^b	1.3 (1.3)	2.4 (2.6)	6.1 (4.2)	11.6	8.1	7.5

Nota: Na identificação da localização dos extensómetros colados no estribo a seta que aponta para a esquerda indica que o extensómetro está do lado oposto ao representado na fotografia. ^a Este extensómetro não funcionou. ^b Valores entre parêntesis referem-se à viga 2S-R-A cujo valor de F_{max} foi igual a 315 kN.

Por forma a ilustrar a variação das extensões registadas, durante o processo de carregamento de uma viga até ao instante em que atinge a sua capacidade de carga máxima, no laminado e no estribo de aço que continham extensómetros eléctricos, na Tabela 4.6 apresentam-se valores das referidas extensões para diferentes níveis de carga da viga 2S-3LI60-A. O valor máximo da extensão registada no laminado instrumentado foi 11.1‰ e ocorreu no Ext.2. Este extensómetro foi o que assinalou os maiores valores da extensão devido ao facto de se encontrar próximo da fenda de rotura de corte. Por outro lado, o Ext.4 registou os valores mais baixos de extensão por ser, dos quatro que foram colados no laminado, o que se encontrava mais distante da fenda de rotura de corte. Na Tabela 4.6 também se apresentam valores das extensões registadas no estribo instrumentado da viga 2S-3LI60-A e da viga 2S-R-A para três níveis de carga, sendo possível constatar que o estribo da viga sem reforço de CFRP apresentou extensões mais elevadas. Esta ocorrência deveu-se ao facto do reforço de CFRP ter atrasado a progressão da abertura da fenda de corte.

Nas Figuras 4.21 e 4.22 apresenta-se a variação das extensões no laminado e estribo de aço instrumentados, respectivamente, ocorrida durante o ensaio da viga 2S-3LI60-A. Estas figuras permitem constatar que, numa fase inicial do carregamento, os elementos resistentes ao esforço transversal não foram activados. A activação destes apenas ocorreu no instante em que foram atravessados por uma fenda diagonal de corte. No laminado a ordem pelo qual foram activados os extensómetros foi: Ext.3, Ext.2 e Ext.4 (o Ext. 1 não funcionou). Entre os 100 kN e os 150 kN, somente o Ext.3 apresentou alguma deformação, o que é justificado pelo facto de ter sido atravessado por uma fenda de corte (ver figura da Tabela 4.6). A abertura de uma fenda de corte aos 177 kN, que seria a de rotura, na proximidade da anterior, concretamente, nas imediações da secção onde estava colado o extensómetro Ext.2 (ver figura da Tabela 4.6) levou à ocorrência de variação elevada da extensão no Ext.2. A partir deste nível de carregamento os valores das extensões registadas em Ext.2 e Ext.3 subiram significativamente, e de forma mais considerável, a partir do instante em que ocorreu a cedência do aço da armadura transversal na zona atravessada pela fenda de rotura de corte. Na Figura 4.22 é possível verificar que as leituras dos extensómetros Ext.2 e Ext.3 colados no estribo de aço têm uma variação similar pois a posição que os referidos extensómetros tinham, em relação ao plano da fenda de rotura de corte, era de quase simetria.

A informação do registo das extensões nos laminados e estribos instrumentados das restantes vigas da série A está apresentada no anexo C desta dissertação. A análise dos dados referentes à extensometria colocada nos estribos permitiu concluir que em todas as vigas com CFRP a carga máxima foi atingida com as armaduras transversais instrumentadas com extensómetros em cedência.

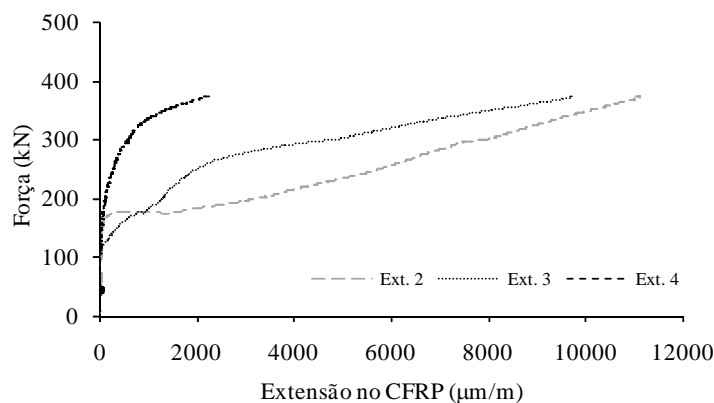


Figura 4.21 - Extensões no laminado instrumentado até à carga máxima (viga 2S-3LI60-A).

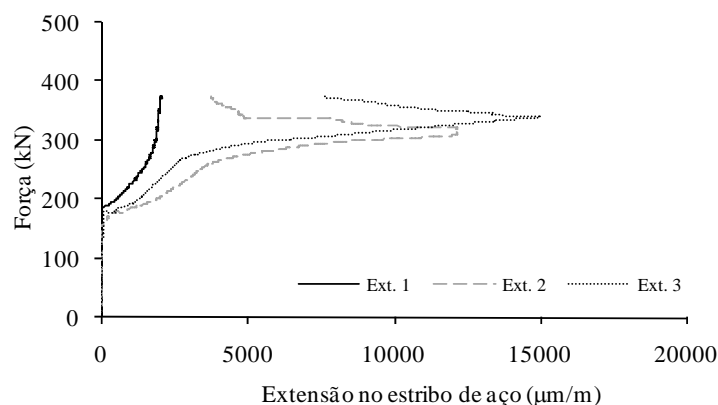


Figura 4.22 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 2S-3LI60-A).

4.2.4.5 - Considerações sobre os resultados obtidos na série A

A realização dos ensaios das vigas da série A e os resultados que foram obtidos permitiu, desde logo, avançar com algumas considerações, que serão tidas em conta no Capítulo 5 na análise geral dos resultados do programa experimental descrito ao longo deste capítulo, e que se passam a expor:

- O uso da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da orientação e da percentagem de CFRP, permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga de vigas de betão armado de secção em T com rotura por corte. Exceptuando dois modelos, as soluções de reforço de CFRP estudadas proporcionaram um aumento da capacidade máxima de carga que variou entre os 13% e os 29%. Em termos do acréscimo relativo de carga entre a formação da fenda crítica de corte na viga de referência (2S-R-A) e a carga de rotura das vigas reforçadas, $(\Delta F / F^{2S-R-A})_{max}$, as soluções de CFRP testadas conduziram a valores entre 9% e 33%.
- Os ganhos de resistência proporcionados pelos sistemas de reforço em CFRP adoptados $(\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-A})$ e $(\Delta F / F^{2S-R-A})_{max}$ foram, de um modo geral, proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, maiores valores de ρ_f garantiram maiores aumentos da capacidade resistente

(a exceção foi a viga 2S-8LI45-A ($\rho_f = 0.16\%$) que teve uma capacidade de carga máxima ligeiramente inferior à da viga 2S-5LI45-A ($\rho_f = 0.1\%$)). Em termos de orientação dos reforços, e independentemente da percentagem de CFRP, a solução com laminados a 60° foi mais eficaz que as soluções com laminados verticais e inclinados a 45° . De um modo geral, a solução de laminados a 45° foi mais eficaz que a solução com laminados verticais.

- Os modelos reforçados com a maior percentagem de CFRP apresentaram um valor médio da carga máxima igual a 96% da verificada no modelo de viga de betão armado (viga 6S-R-A) “equivalente” em termos capacidade de carga máxima.
- O efeito do reforço de CFRP foi evidente a partir do momento em que surgiram as fendas de corte, garantindo um acréscimo de rigidez que aumentou com a percentagem de CFRP. Neste contexto refira-se que, após o início da formação das fendas diagonais de corte, a capacidade de carga das vigas com a máxima percentagem de CFRP foi bastante maior do que a registada na viga 6S-R-A. Este facto evidencia o acréscimo de rigidez proporcionado pelos laminados de CFRP.
- A resistência do betão tem um papel fundamental no desempenho da técnica de reforço ao corte em estudo. De facto, de um modo geral os laminados que cederam, e que, por consequência provocaram o esgotamento da capacidade máxima das vigas, continham betão adjacente ao comprimento destacado do laminado. A quantidade de betão que se destacou foi condicionada pela percentagem de CFRP e pelo padrão de fendilhação que se formou. Para a menor percentagem de CFRP, o laminado que cedeu foi atravessado por um número reduzido de fendas, o que conduziu a valores elevados de comprimentos de amarração (cerca de 10 cm no caso de laminados inclinados). Para esta gama de percentagens de CFRP os laminados cederam individualmente, sem qualquer interferência com os laminados vizinhos. À medida que a percentagem de CFRP aumenta, o padrão de fendilhação instalado nas vigas foi mais repartido originando menores comprimentos de amarração dos laminados. Além disso, para o caso de percentagens de CFRP elevadas pode ocorrer um efeito de grupo na cedência dos laminados devido à sua proximidade, conduzindo ao destacamento de um volume considerável de betão.
- A distância entre os elementos resistentes ao esforço transversal (laminados e estribos de aço) tem uma influência na eficácia de uma determinada solução de reforço ao corte. A distribuição dos referidos elementos deve ser a mais homogénea possível.
- Os pequenos acréscimos de carga máxima obtidos nas soluções referentes à menor percentagem de CFRP, nomeadamente no caso de laminados verticais e inclinados a 45° , justificam que qualquer

solução de reforço de CFRP tenha que ter um espaçamento máximo, a partir do qual o rendimento do CFRP pode ser posto em causa.

- A extensão média registada nos laminados instrumentados em correspondência com a carga máxima variou entre os 3.9‰ e os 8.4‰, enquanto que a extensão máxima no CFRP variou entre os 6.0‰ e os 11.1‰. A cedência das armaduras transversais instrumentadas com extensómetros no momento em que as vigas atingiram a sua capacidade máxima de carga foi verificada em todas as vigas com CFRP.

4.3 - SÉRIE B

4.3.1 - Concepção dos modelos

De acordo com o que foi descrito na secção 4.1, na série de vigas B foram ensaiados modelos com soluções de CFRP às quais estavam associadas percentagens de reforço ρ_f de valor diferente ao das analisadas nas vigas da série A. Com efeito, na presente série foram testadas três novas gamas de percentagem de reforço e, para cada uma delas, foram analisadas as três orientações para o CFRP adoptadas no estudo referente à série A (laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60°). Além disso, algumas das soluções de reforço que se acabam de referir foram aplicadas, não só em vigas com a mesma percentagem de estribos de aço das vigas da série A ($\rho_{sw} = 0.10\%$), mas também em vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$. Desta forma, pretendeu-se avaliar o efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica de reforço em análise. Na série de vigas B o desempenho da técnica NSM com laminados de CFRP foi avaliado em três vertentes: i) comparando o comportamento das vigas reforçadas usando a técnica NSM com o da viga de referência sem reforço; ii) comparando o comportamento das vigas reforçadas com a técnica NSM com o de vigas reforçadas usando a técnica EBR (faixas discretas de manta de CFRP unidireccional, em forma de U, sem qualquer tipo de fixação nas extremidades); iii) comparando o comportamento das vigas reforçadas usando a técnica NSM com o da viga em betão armado em que o reforço ao corte foi garantido por um acréscimo de estribos verticais de aço.

Na série B foram testadas vinte e cinco vigas de betão armado de secção transversal em T e que, de acordo com a Figura 4.23, tinham uma geometria igual à dos modelos de viga adoptados na série A (ver Figura 4.3). Como armadura longitudinal de tracção, as vigas continham dois varões de 32 mm de diâmetro (2 ϕ 32) e um varão de 16 mm de diâmetro (1 ϕ 16) colocados de acordo com a disposição representada na Figura 4.23. Esta solução de armadura adoptada ($\rho_{sl} = 2.8\%$) teve como objectivo

colocar os varões longitudinais apenas numa camada e não em duas como foi efectuado nas vigas da série A ($\rho_{sl} = 2.9\%$). Além de terem geometrias iguais e uma relação a/d semelhante ($a/d = 2.5$), as vigas das séries A e B tinham a mesma solução em termos da quantidade de armadura transversal no vão de corte b ($\phi 6@75\text{mm}$).

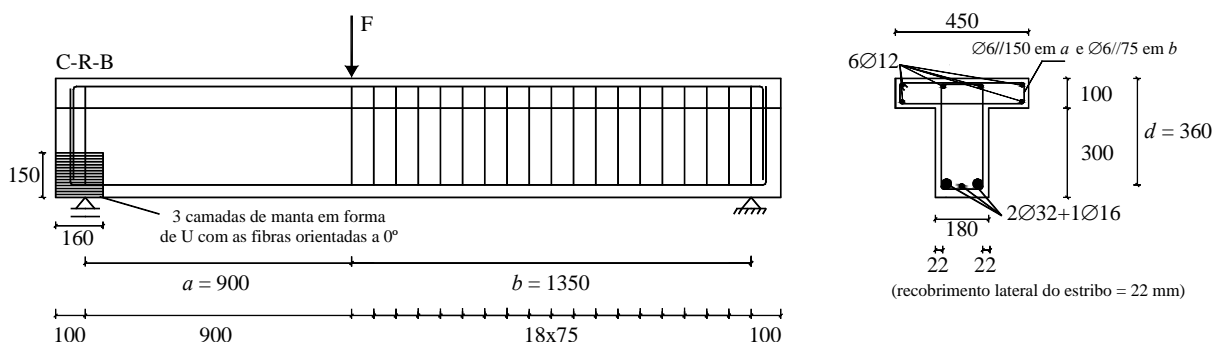


Figura 4.23 - Geometria das vigas da série B (dimensões em mm).

De acordo com o que foi pré-estabelecido, a diferença entre modelos de vigas da série B ficou unicamente restrita ao vão de corte a , concretamente, na forma como aí foi garantida a resistência ao esforço transversal. O grupo de modelos ensaiados nesta série englobou: uma viga sem qualquer reforço ao corte (C-R-B); uma viga com estribos $\phi 6@112.5$ mm (viga 7S-R-B com ρ_{sw} de 0.28%); uma viga com estribos $\phi 6@300\text{mm}$ (viga 2S-R-B com ρ_{sw} de 0.10%); doze vigas contendo estribos $\phi 6@300\text{mm}$ e reforçadas ao corte com distintas soluções de CFRP; uma viga com estribos $\phi 6@180\text{mm}$ (viga 4S-R-B com ρ_{sw} de 0.17%); e nove vigas contendo estribos $\phi 6@180\text{mm}$ e reforçadas ao corte com distintas soluções de CFRP.

Das doze vigas com estribos $\phi 6@300\text{mm}$ ($\rho_{sw} = 0.10\%$) reforçadas ao corte com CFRP, em nove o reforço foi aplicado usando a técnica NSM com laminados de CFRP (foram testadas três percentagens de CFRP e, para cada uma destas, foram analisadas três orientações dos laminados) e nas restantes três o reforço foi aplicado usando a técnica da colagem externa (EBR) com mantas de CFRP. Concretamente, para cada percentagem testada de laminados de CFRP inseridos foi concebida uma solução de reforço de CFRP colado externamente.

Das nove vigas com estribos $\phi 6@180\text{mm}$ ($\rho_{sw} = 0.17\%$) e reforçadas ao corte com CFRP, em sete o reforço foi aplicado usando a técnica NSM com laminados de CFRP e, nas restantes duas, o reforço foi aplicado usando a técnica EBR com mantas de CFRP. Neste grupo de vigas foram aplicadas as soluções de reforço das vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ referentes à percentagem de CFRP mínima e intermédia (NSM e EBR). Uma destas soluções em termos de NSM (laminados verticais com a menor percentagem de CFRP) foi aplicada em duas vigas, que se distinguíam unicamente na posição

em que foram colocados os laminados relativamente ao posicionamento dos estribos de aço (foi mantido o número e o espaçamento dos laminados).

Tal como representado na Figura 4.23, o betão de recobrimento lateral dos estribos era de 22 mm. Os laminados utilizados nesta série de vigas tinham uma secção transversal de $1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$, enquanto que para o caso das mantas de CFRP foi adoptada a solução de faixas discretas em forma de U, com as fibras orientadas a 90° relativamente ao eixo da viga, e com dimensões de 0.176 mm de espessura e 60 mm de largura.

De acordo com o que foi inicialmente pré-estabelecido, o pré-dimensionamento das vigas foi efectuado de forma a terem rotura por corte. A obtenção da quantidade de laminados de CFRP (técnica NSM) referente às vigas com o valor mais elevado de ρ_f (apenas aplicado nas vigas com estribos $\phi 6@300\text{mm}$ no vão de corte a), independentemente da orientação dos laminados, teve como princípio impor que as referidas vigas tivessem uma capacidade de carga máxima semelhante à da viga de betão armado com a maior percentagem de estribos de aço considerada ($\phi 6@112.5\text{mm}$ no vão de corte a). Para tal, foi utilizado o mesmo critério de pré-dimensionamento adoptado para as vigas da série A, e que conduziu às seguintes soluções de reforço com CFRP para o vão de corte a : dez laminados em cada face da viga, para os casos dos reforços dispostos na vertical e com uma inclinação de 45° , e nove laminados em cada face da viga para o caso do reforço inclinado a 60° . Para as três orientações de CFRP analisadas (90° , 45° e 60°), as soluções de reforço, por face do vão de corte a , referentes à percentagem mínima e intermédia de CFRP foram as seguintes: quatro laminados para a percentagem mínima de reforço; sete laminados (inclinação de 90° e 45°) e seis laminados (inclinação de 60°) para a percentagem intermédia de reforço. Quer para a percentagem mínima como para a percentagem intermédia de CFRP, o espaçamento dos laminados para cada uma das orientações foi obtido de forma a que as respectivas vigas tivessem uma capacidade máxima resistente semelhante.

Tal como foi referido anteriormente, para cada uma das três percentagens de laminados testadas foi concebida uma solução de reforço com mantas de CFRP coladas externamente. O pré-dimensionamento dos reforços referentes à técnica EBR foi feito considerando as disposições do ACI Committe 440 (2002) e, teve como princípio, a imposição da semelhança entre o valor da capacidade máxima de carga das vigas reforçadas usando a técnica NSM e o valor da capacidade máxima de carga das respectivas vigas reforçadas usando a técnica EBR. As soluções para mantas de CFRP foram as seguintes: quatro faixas de uma camada espaçadas de 180 mm para a menor percentagem de CFRP; sete faixas de uma camada espaçadas de 114 mm para a percentagem intermédia de CFRP; sete faixas de duas camadas espaçadas de 114 mm para a maior percentagem de CFRP.

Tabela 4.7 - Informações gerais sobre os modelos de vigas da série B (cont.).

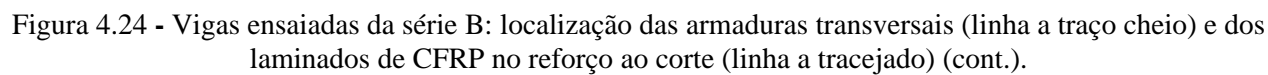
Viga	Sistema de reforço ao corte no vão de corte a				
	Material	Quantidade	Porcentagem* [%]	Espaçamento [mm]	Ângulo [°]
C-R-B	-	-	-	-	-
7S-R-B	Estribos de aço	7 ϕ 6 de dois ramos	0.28	112.5	90
2S-R-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
2S-4LV-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	180	90
2S-7LV-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x7 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	114	90
2S-10LV-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x10 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.18	80	90
2S-4LI45-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	275	45
2S-7LI45-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x7 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	157	45
2S-10LI45-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x10 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.19	110	45
2S-4LI60-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.07	243	60
2S-6LI60-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x6 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.11	162	60
2S-9LI60-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x9 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.16	108	60
2S-4M-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Mantas de CFRP (EBR)	4 faixas em forma de U (0.176x60 mm ²) - 1 camada	0.07	180	90
2S-7M(1)-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Mantas de CFRP (EBR)	7 faixas em forma de U (0.176x60 mm ²) - 1 camada	0.10	114	90
2S-7M(2)-B	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Mantas de CFRP (EBR)	7 faixas em forma de U (0.176x60 mm ²) - 2 camadas	0.21	114	90

Tabela 4.7 (cont.) - Informações gerais sobre os modelos de vigas da série B.

4S-R-B	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
4S-4LV-B	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	180	90
4S-4LVa-B**	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	180	90
4S-7LV-B	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x7 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	114	90
4S-4LI45-B	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	275	45
4S-7LI45-B	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x7 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	157	45
4S-4LI60-B	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.07	243	60
4S-6LI60-B	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x6 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.11	162	60
4S-4M-B	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
	Mantas de CFRP (EBR)	4 faixas em forma de U (0.176x60 mm ²) - 1 camada	0.07	180	90
4S-7M(1)-B	Estribos de aço	4φ6 de dois ramos	0.17	180	90
	Mantas de CFRP (EBR)	7 faixas em forma de U (0.176x60 mm ²) - 1 camada	0.10	114	90

* A percentagem de estribos de aço foi obtida usando a equação (2.5) e a percentagem de laminados de CFRP foi obtida usando a equação (3.1). A percentagem de mantas de CFRP foi obtida usando a equação $\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f}{b_w \cdot s_f \cdot \sin \theta_f} \times 100$, em que n , t_f e w_f são, respectivamente, o número de camadas, a espessura e a largura das faixas de CFRP. ** A diferença desta viga relativamente à viga 4S-4LV-B relaciona-se com o posicionamento dos laminados em relação aos estribos de aço (Figura 4.24).

No anexo A é descrito, pormenorizadamente, o pré-dimensionamento das soluções de reforço ao corte com CFRP testadas na série B. Na Tabela 4.7 e nas Figuras 4.23 e 4.24 apresentam-se as principais informações relativas às vigas da série B. Os laminados e as mantas de CFRP foram distribuídos ao longo da linha AB, representada na Figura 4.3, tendo o ponto B sido obtido admitindo-se uma degradação da carga a 45°. À semelhança do que ocorreu nas vigas da série A, para evitar o destacamento do betão de recobrimento no apoio mais solicitado, este canto foi reforçado localmente, tal como representado na Figura 4.23, com três camadas de manta de CFRP unidireccional, ficando as fibras dispostas segundo a direcção do eixo da viga.



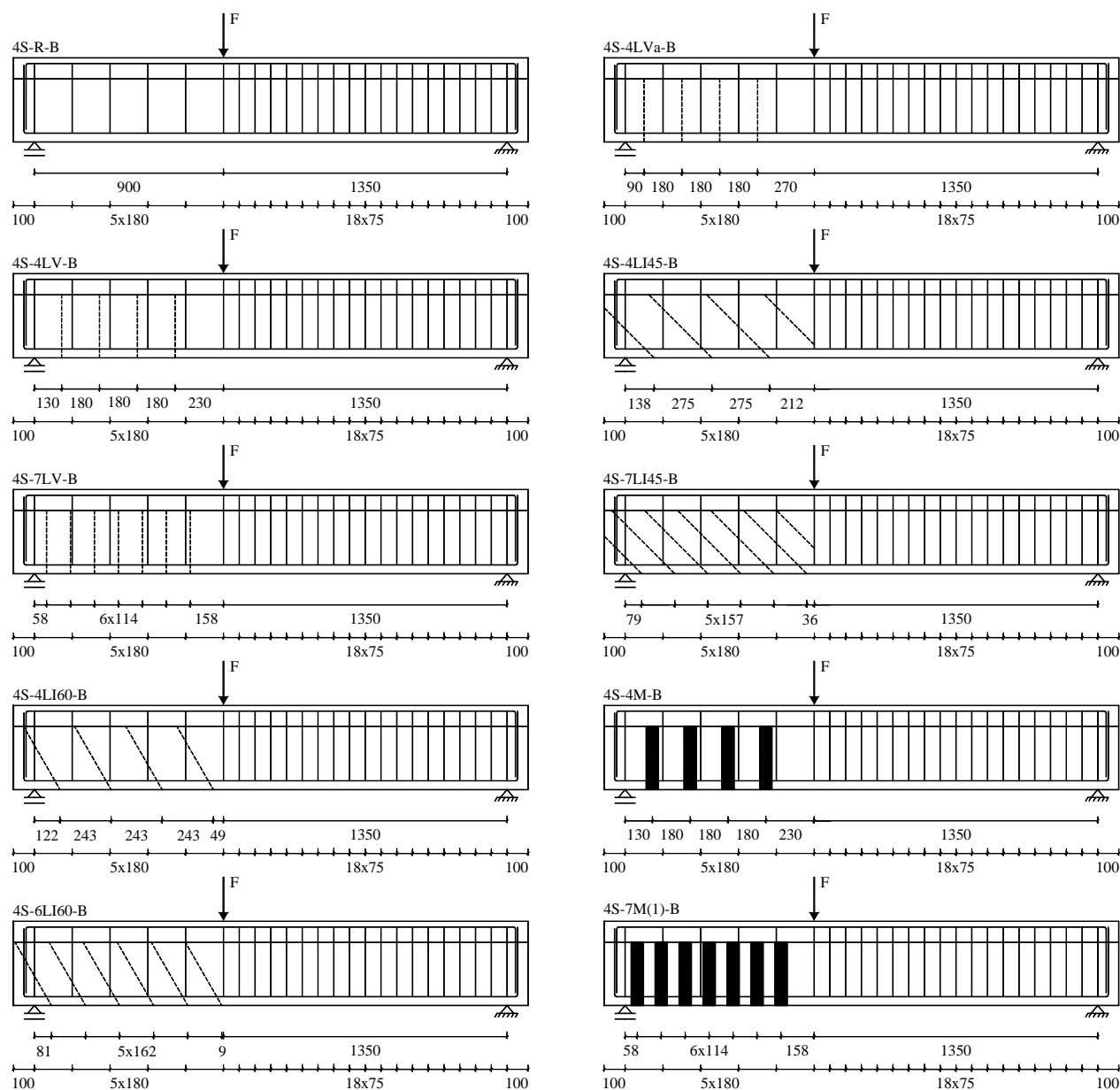


Figura 4.24 (cont.) - Vigas ensaiadas da série B: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado).

4.3.2 - Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão das vigas, cuja composição se encontra registada no anexo B desta dissertação, foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas, à qual correspondeu uma idade média de 106 dias. Para tal, de acordo com a EN 206-1 (2000) efectuaram-se ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 3.5). Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm, 12 mm, 16 mm e de 32 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial (Figura 3.5) efectuados seguindo o estipulado na EN 10002-1 (1990). A caracterização dos laminados de CFRP utilizados

(S&P Laminates CFK 150/2000, S&P (2002)) foi efectuada por intermédio da realização de ensaios de tracção uniaxial (Figura 4.25), segundo a ISO 527-5 (1997), em seis provetes com as dimensões representadas na Figura 3.6 (a única diferença foi a largura do laminado que nesta série de vigas era de 9.5 mm). Para aquisição das extensões no CFRP ao longo do ensaio foram utilizados dois sistemas posicionados a meio do comprimento e da largura do laminado (um em cada face do CFRP): um extensómetro eléctrico e um sensor de fibra óptica. Na Figura 4.25 apresenta-se o diagrama tensão vs extensão obtido no ensaio de um dos provetes de CFRP onde é possível observar que os resultados obtidos com os dois sistemas de medida de extensões são semelhantes.

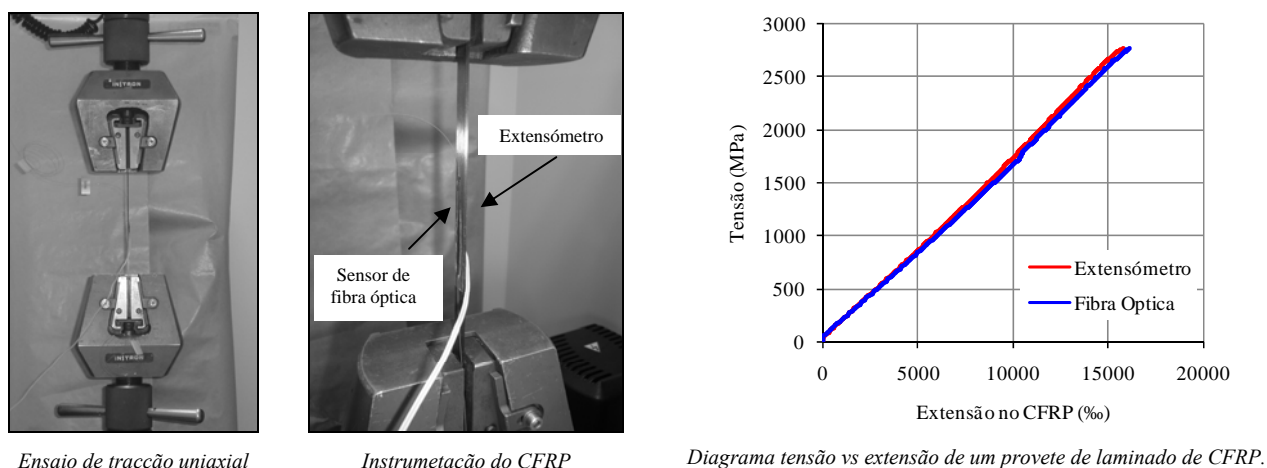


Figura 4.25 - Ensaio de tracção uniaxial de um provete de laminado de CFRP instrumentado.

A manta de CFRP unidireccional que foi utilizada para o reforço ao corte usando a técnica da colagem externa, assim como para o reforço do canto inferior das vigas, tinha a designação comercial de S&P C-Sheet 240 - 300 gr/m² (S&P, 2002). As propriedades mecânicas deste material foram avaliadas por Barros *et al.* (2007). Na Tabela 4.8 estão registados os valores médios das propriedades mecânicas mais significativas do betão, do aço, dos laminados e das mantas de CFRP obtidos experimentalmente. Os valores determinados em cada provete nos ensaios de caracterização dos referidos materiais estão compilados no anexo B. O adesivo (laminados), o primário (manta) e a resina de saturação (manta) utilizados na aplicação dos reforços de CFRP foram os mesmos que já tinham sido adoptados para os modelos da série A.

No caso da técnica da colagem externa, a caracterização da ligação betão-CFRP foi efectuada por intermédio da realização de ensaios de arrancamento por tracção (“pull-off”), de acordo com o representado na Figura 4.26. O ensaio “pull-off” consistiu no registo da força de tracção necessária para o arrancamento de pastilhas metálicas, de secção circular com 45 mm de diâmetro, coladas sobre as mantas de CFRP (Figura 4.26). O valor da tensão de tracção, $f_{ct,p}$, foi obtida dividindo o esforço de tracção na rotura pela secção da pastilha. De forma a circunscrever a tensão de aderência à área real de colagem do elemento metálico efectuou-se o pré-caroteamento no perímetro da pastilha. Os

ensaios de arrancamento foram efectuados em pastilhas coladas sobre mantas de CFRP aplicadas em três das vigas reforçadas com a técnica da colagem externa. Após o ensaio das referidas vigas estipulou-se o seguinte critério para escolha dos locais onde se colariam as pastilhas metálicas: a manta não deveria ter sido atravessada por qualquer tipo de fenda e não deveria apresentar sinais de destacamento/descolamento. Os valores médios da tensão de aderência ($f_{ctm,p}$) obtidos foram de 3.5 MPa, 3.2 MPa e 3.1 MPa para as pastilhas coladas, respectivamente, nas vigas 2S-4M-B, 2S-7M(1)-B e 2S-7M(2)-B. A média dos referidos valores foi 3.3 MPa, verificando-se ser superior ao valor mínimo recomendável para a aplicação da técnica da colagem externa de compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão, que deve ser de 1.4 MPa (ACI Committee 440, 2002).

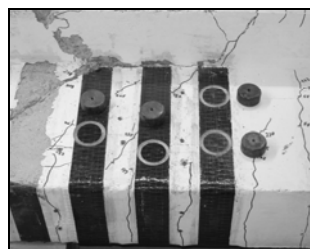
Tabela 4.8 - Principais propriedades do betão, do aço, dos laminados e mantas de CFRP referentes à série B.

Betão	Resistência à compressão			
	$f_{cm} = 31.7$ MPa (aos 28 dias)	$f_{cm} = 39.7$ MPa (aos 106 dias - idade à data do ensaio das vigas)		
Aço	Resistência à tracção	$\phi 6$	$\phi 12$	$\phi 16$
	f_{sym} (Tensão de cedência)	542 MPa	453 MPa	447 MPa
	f_{sum} (Tensão última)	594 MPa	591 MPa	566 MPa
Laminado de CFRP	Resistência à tracção	Módulo de Elasticidade		Extensão máxima*
	$f_{fum} = 2741.7$ MPa (Tensão última)	$E_{fm} = 170.9$ GPa		$\epsilon_{fum} = 16.0$ ‰
Mantas de CFRP	Resistência à tracção	Módulo de Elasticidade		Extensão máxima
	$f_{fum} = 2862.9$ MPa (Tensão última)	$E_{fm} = 218.4$ GPa		$\epsilon_{fum} = 13.3$ ‰

* Valor obtido pela lei de Hooke. ** Devido à limitação do equipamento foi necessário proceder a uma redução da secção para 25 mm na zona central de cada provete (ver anexo B). O mesmo se passou para o caso dos varões de 32 mm utilizados nas vigas das séries C e D.



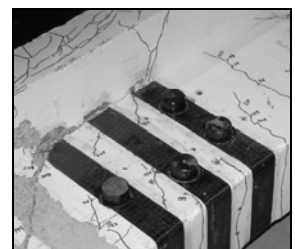
Realização do pré-caroteamento



Após o pré-caroteamento



Colagem das pastilhas metálicas com MBrace Resin 55



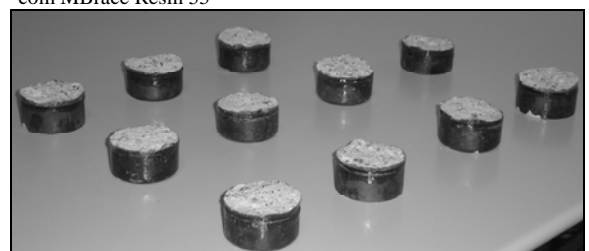
Após a colagem das pastilhas



Realização do ensaio de pull-off



Após o ensaio de pull-off



Modo de rotura observado

Figura 4.26 - Realização de ensaios de pull-off.

4.3.3 - Sistema de ensaio e instrumentação dos modelos

As vigas foram submetidas a ensaios de flexão sob três pontos de carga até à sua rotura. O esquema de ensaio das vigas da série B foi idêntico ao adoptado na série A (Figura 4.5). O mesmo se passou em termos da célula de carga utilizada, do número e respectiva distribuição dos LVDT's (Figura 4.6), assim como, do tipo de ensaio (controlo de deslocamentos por intermédio do transdutor colocado na secção de aplicação da carga e uma velocidade de deformação de 0.01mm/s).

Em termos de instrumentação dos laminados e dos estribos de aço, o critério adoptado para as vigas da série A foi mantido para os modelos da série B com ρ_{sw} de 0.17%, enquanto que para os modelos da presente série com ρ_{sw} de 0.10% foi introduzida uma alteração em termos de CFRP com a instrumentação de mais um laminado. Os laminados instrumentados tinham quatro extensómetros colados de acordo com a configuração representada na Figura 4.7. O estribo instrumentado tinha três extensómetros colados de acordo com a distribuição representada na Figura 4.8. Em relação às mantas instrumentadas foi adoptado o mesmo critério dos laminados. Em cada uma das referidas mantas foram colados quatro extensómetros eléctricos de acordo com as disposições apresentadas na Figura 4.27. A localização dos laminados, mantas e estribos instrumentados está representada na Figura 4.28, para o caso das vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$, e na Figura 4.29 para o caso das vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$. A face da alma da viga onde foram instalados os laminados e as mantas instrumentadas, assim como o ramo do estribo contendo dois extensómetros, foi a oposta à representada nas Figuras 4.28 e 4.29. No caso das vigas com manta de CFRP que continham uma percentagem $\rho_{sw} = 0.17\%$ foram colocados dois extensómetros em cada face da viga de acordo com o representado na Figura 4.27 (o Ext.1 e Ext.3 ficaram na face representada na Figura 4.29). Nas vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ o estribo instrumentado foi, à semelhança do que aconteceu nas vigas da série A, o que estava localizado mais próximo do apoio e nas vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$ o estribo instrumentado foi o terceiro a contar da secção de aplicação da carga. Em relação à viga 7S-R-B os extensómetros foram colados no estribo central.

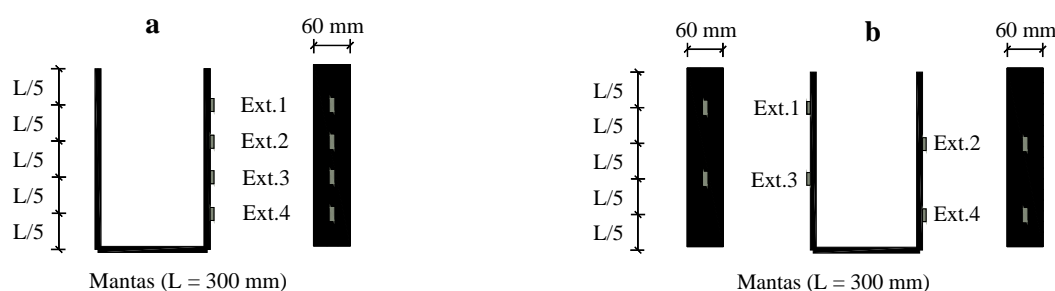


Figura 4.27 - Disposição dos extensómetros aplicados na manta de CFRP instrumentada: a) vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ e b) vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$.

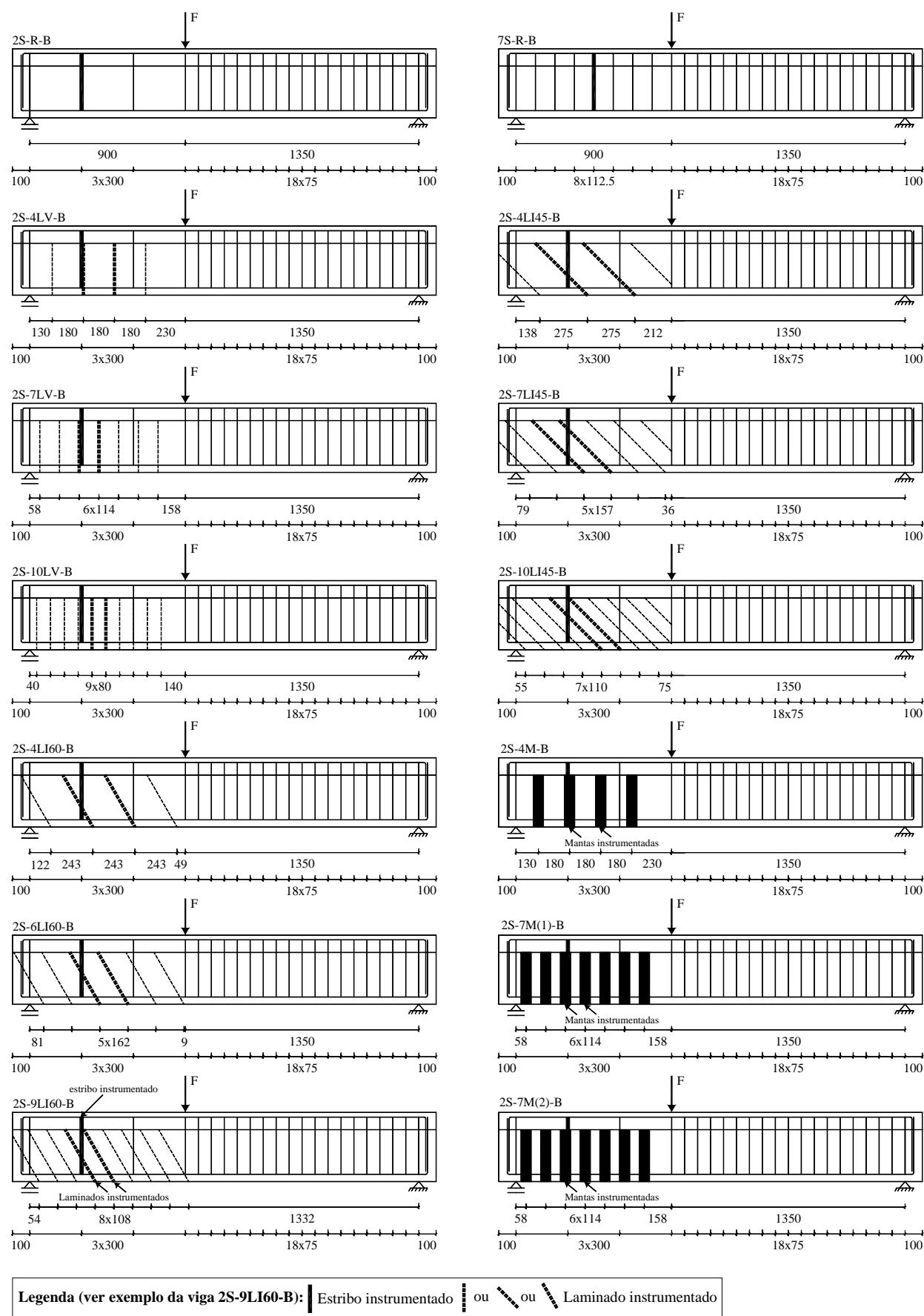


Figura 4.28 - Localização dos estribos e laminados instrumentados nas vigas da série B com $\rho_{sw} = 0.10\%$ e na viga 7S-R-B.

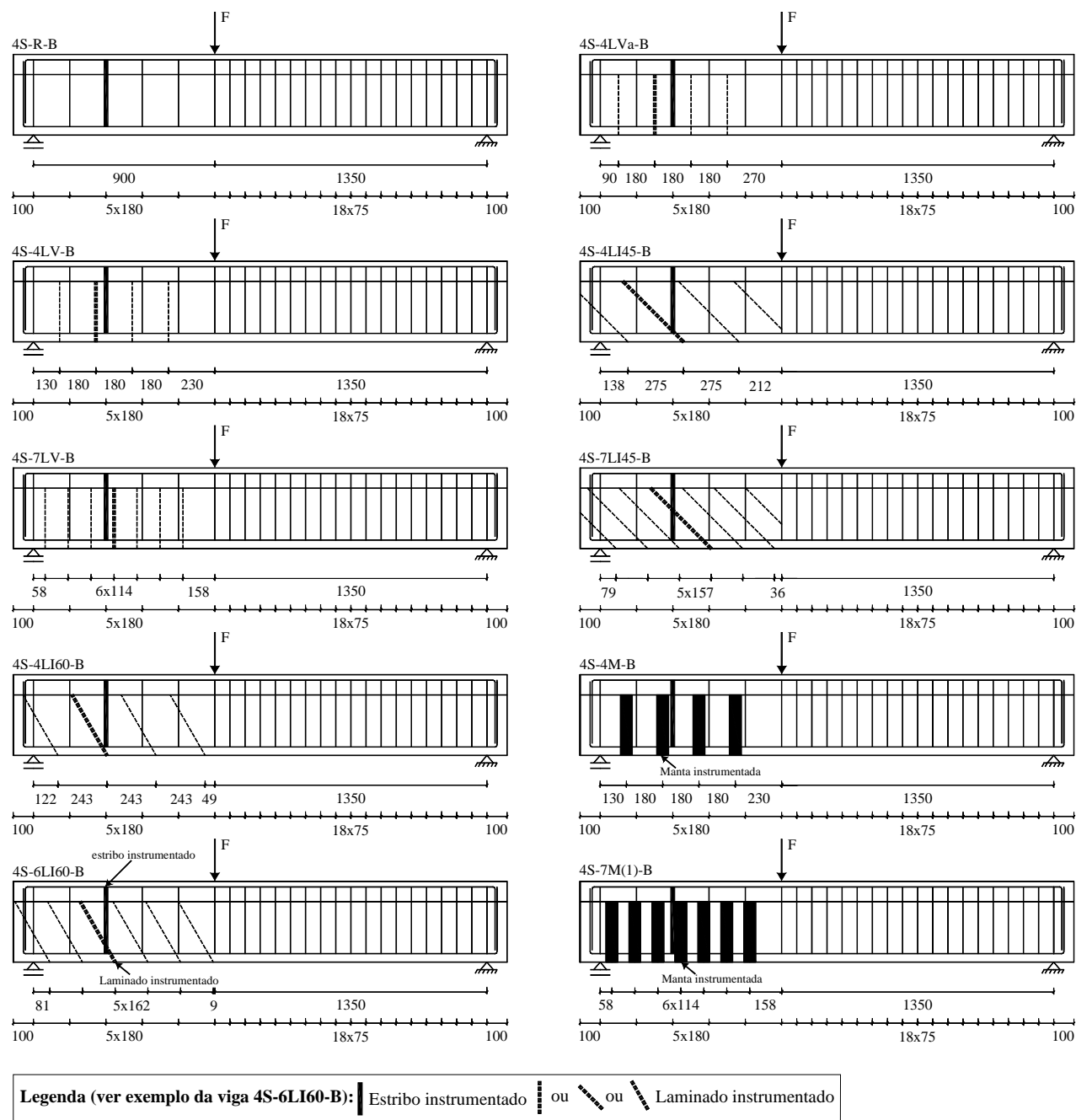


Figura 4.29 - Localização dos estribos e laminados instrumentados nas vigas da série B com $\rho_{sw} = 0.17\%$.

4.3.4 - Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos nos ensaios das vigas da série B serão apresentados e analisados em três partes: a primeira associada ao grupo de vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$; a segunda será dedicada ao grupo de vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$; e a terceira abordará a influência da percentagem ρ_{sw} na eficácia da técnica de reforço ao corte em análise.

4.3.4.1 - Vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ no vão de corte a

4.3.4.1.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura

Na Tabela 4.9 apresenta-se o valor da força máxima (F_{max}) obtida em cada uma das vigas ensaiadas na série B contendo $\rho_{sw} = 0.10\%$. Atribuindo as designações F_{max}^{2S-R-B} e F_{max}^{7S-R-B} à carga máxima registada, respectivamente, na viga 2S-R-B e na viga 7S-R-B, determinaram-se os factores $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-B}$ e $F_{max} / F_{max}^{7S-R-B}$ indicados na Tabela 4.9 ($\Delta F_{max} = F_{max} - F_{max}^{2S-R-B}$). Nesta tabela também se apresenta o valor do parâmetro $(\Delta F / F^{2S-R-B})_{max}$, que corresponde ao valor máximo da relação entre o incremento de carga proporcionado pelo reforço de CFRP (ΔF), após a formação da fenda diagonal de corte na viga de referência 2S-R-B, e o valor da correspondente força na referida viga de referência F^{2S-R-B} (ver Figura 4.30.b). As flechas na secção de aplicação da carga correspondentes ao parâmetro $(\Delta F / F^{2S-R-B})_{max}$, designada por $u_{(\Delta F / F^{2S-R-B})_{max}}$, e à carga máxima ($u_{F_{max}}$) também estão registadas na Tabela 4.9. As respostas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga e a relação $\Delta F / F^{2S-R-B}$ vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com CFRP estão apresentadas na Figura 4.30. O primeiro tipo de resposta traduz o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente.

A análise dos resultados incluídos na Tabela 4.9 e os gráficos da Figura 4.30 permite constatar que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da sua percentagem e orientação, proporcionou um aumento da capacidade de carga das vigas. A presença do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal tornou-se evidente a partir do momento associado à formação da fenda diagonal de corte na viga de referência 2S-R-B. Com efeito, a perda de rigidez que se verificou na curva de comportamento da viga 2S-R-B, para uma carga de cerca de 201 kN e uma flecha na secção de aplicação da carga de 2.15 mm, não ocorreu nas vigas reforçadas com CFRP, o que permite constatar que o CFRP ofereceu resistência efectiva à abertura das fendas de corte que os interceptaram, proporcionando um aumento de rigidez, conforme se pode verificar da análise da Figura 4.30. Além disso, é possível verificar que, de um modo geral, o aumento de rigidez foi proporcional à percentagem de laminados de CFRP. Estas constatações confirmam o que já tinha sido observado na análise dos resultados obtidos nas vigas da série A.

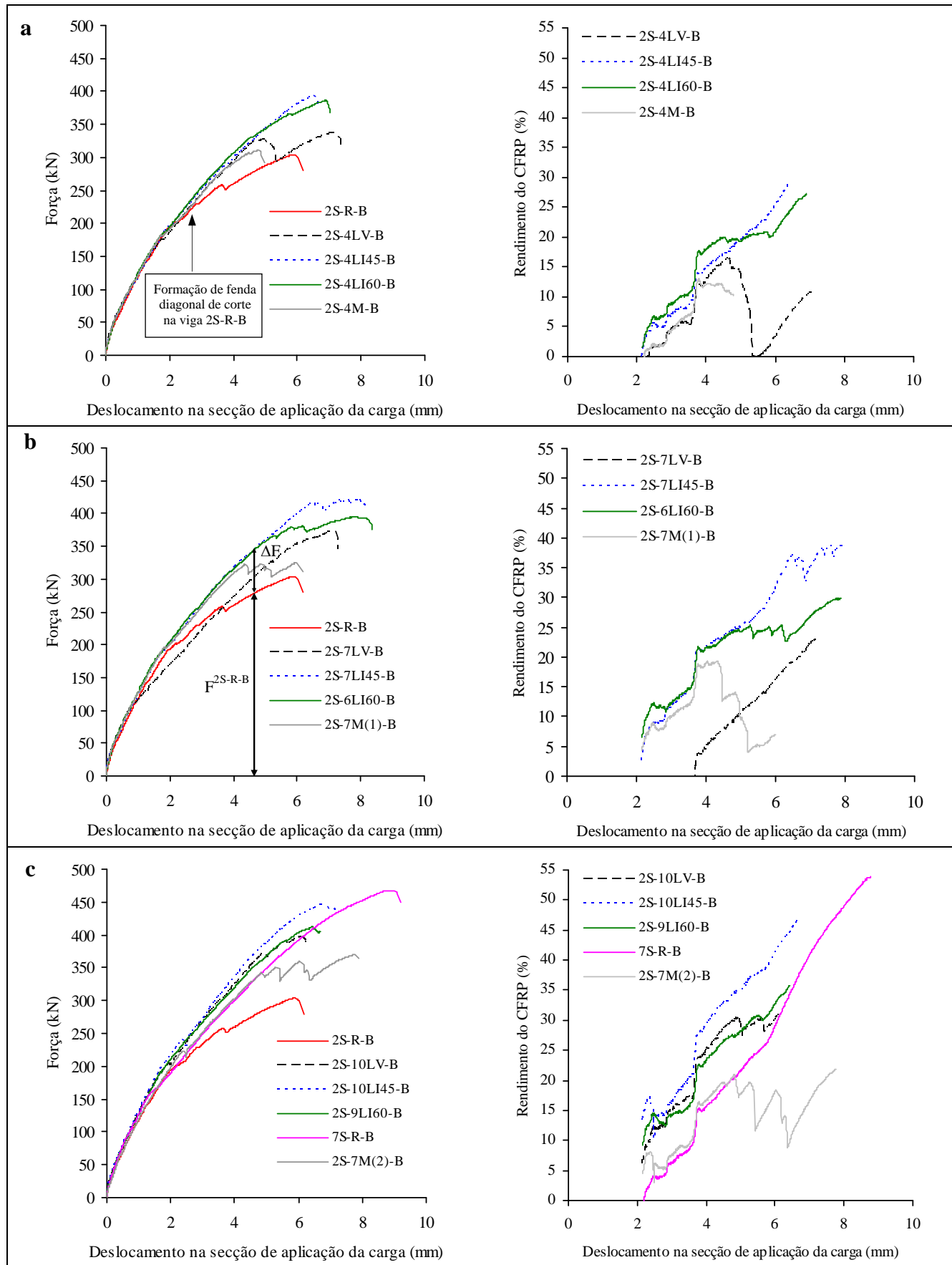


Figura 4.30 - Comportamento das vigas ensaiadas da série B com $\rho_{sw} = 0.10\%$: a) percentagem mínima de CFRP; b) percentagem intermédia de CFRP; c) percentagem máxima de CFRP.

Tabela 4.9 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série B - $\rho_{sw} = 0.10\%$).

Viga	F_{max} [kN]	$\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-B}$ [%]	$F_{max} / F_{max}^{7S-R-B}$	$(\Delta F / F^{2S-R-B})_{max}$ [%]	$u_{F_{max}}$ [mm]	$u_{(\Delta F / F^{2S-R-B})_{max}}$ [mm]
C-R-B	207.0	-	0.44	-	7.48	-
2S-R-B	303.8	-	0.65	0.0	5.88	-
7S-R-B	467.5	53.9	1.00	53.9	8.78	8.78
2S-4LV-B	337.4	11.1	0.72	16.4	7.14	4.65
2S-7LV-B	374.1	23.1	0.80	23.1	7.17	7.17
2S-10LV-B	397.5	30.8	0.85	30.8	6.09	6.09
2S-4LI45-B	392.8	29.3	0.84	29.3	6.45	6.45
2S-7LI45-B	421.7	38.8	0.90	38.8	7.93	7.93
2S-10LI45-B	446.5	47.0	0.96	46.9	6.76	6.74
2S-4LI60-B	386.4	27.2	0.83	27.2	6.90	6.90
2S-6LI60-B	394.4	29.8	0.84	29.8	7.87	7.77
2S-9LI60-B	412.7	35.8	0.88	35.8	6.44	6.44
2S-4M-B	311.1	2.4	0.67	13.0	4.79	3.78
2S-7M(1)-B	325.1	7.0	0.70	19.4	5.99	4.32
2S-7M(2)-B	370.1	21.8	0.79	21.8	7.77	7.77

As soluções com a menor percentagem de laminados de CFRP (maior espaçamento entre laminados consecutivos) foram as que conduziram a menores ganhos de capacidade de carga máxima: 11.1%, 29.3% e 27.2%, respectivamente, para a solução de laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60°. Em termos do parâmetro $(\Delta F / F^{2S-R-B})_{max}$ apenas a contribuição da solução de reforço da viga 2S-4LV-B foi maior do que em termos de contributo para o aumento da capacidade máxima de carga (16.4%). Para a menor percentagem de CFRP, a viga “equivalente” em termos de reforço com mantas coladas externamente (viga 2S-4M-B) obteve uma capacidade de carga máxima 2.4% superior à da viga de referência 2S-R-B e um valor de $(\Delta F / F^{2S-R-B})_{max}$ de 13.0%.

Em relação às soluções de laminados de CFRP correspondentes ao valor intermédio de ρ_f , o reforço com laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° garantiu, tomando como base de comparação a carga máxima da viga 2S-R-B, um aumento de 23.1%, 38.8% e 29.8%, respectivamente. Para esta gama de ρ_f , os valores de $(\Delta F / F^{2S-R-B})_{max}$ correspondem aos valores do aumento que proporcionaram em termos de carga máxima. Para a percentagem intermédia de CFRP, a viga “equivalente” em termos de reforço com mantas coladas externamente (viga 2S-7M(1)-B)

obteve uma capacidade de carga máxima 7.0% superior à da viga de referência 2S-R-B e um valor de $\left(\Delta F / F^{2S-R-B}\right)_{max}$ de 19.4%.

Das vigas reforçadas com o maior valor de ρ_f , a solução com laminados inclinados a 45°, tal como aconteceu nas restantes percentagens, foi a mais eficaz, garantindo, relativamente à carga máxima da viga 2S-R-B, um aumento em termos de capacidade de carga máxima de 47.0%, enquanto as soluções com laminados verticais e inclinados a 60° garantiram um aumento de 30.8% e 35.8%, respectivamente. Para esta gama de percentagem ρ_f , os valores de $\left(\Delta F / F^{2S-R-B}\right)_{max}$ são iguais aos valores de $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-B}$. Para a maior percentagem de CFRP, a viga “equivalente” em termos de reforço com mantas coladas externamente (viga 2S-7M(2)-B) obteve uma capacidade de carga máxima 21.8% superior à da viga de referência 2S-R-B (o mesmo valor foi obtido para o parâmetro $\left(\Delta F / F^{2S-R-B}\right)_{max}$).

Conforme foi referido anteriormente, as vigas reforçadas com a maior percentagem de CFRP (NSM e EBR) foram concebidas de forma a terem uma capacidade de carga máxima semelhante à da viga de referência 7S-R-B. Os resultados demonstraram que a carga máxima da viga reforçada com a maior percentagem de laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° foi, respectivamente, 85%, 96% e 88% da atingida pela viga 7S-R-B. Em média, as vigas reforçadas com a maior percentagem de CFRP usando a técnica NSM com laminados obtiveram uma capacidade de carga máxima igual a 90% do valor F_{max}^{7S-R-B} . A viga reforçada segundo a técnica EBR contendo a maior percentagem de CFRP (viga 2S-7M(2)-B) teve uma capacidade de carga máxima igual a 79% do valor de F_{max}^{7S-R-B} . Comparando as curvas de comportamento das vigas reforçadas com a técnica NSM, contendo o maior valor de ρ_f , com o da viga “equivalente” em termos de betão armado (7S-R-B) é possível constatar o melhor comportamento das vigas com laminados de CFRP após o momento correspondente à formação da fenda diagonal de corte na viga 2S-R-B (esta situação tal como se referiu anteriormente ocorreu para uma carga de cerca de 201 kN e uma flecha na secção de aplicação da carga de 2.15 mm). Com efeito, o número de laminados aplicados conduziu a um aumento significativo de rigidez, que não foi tão evidente no caso da viga 7S-R-B (Figura 4.30.c). Esta constatação confirma o que já se tinha observado na série de vigas A. O acréscimo de rigidez proporcionado pela solução de reforço com mantas de CFRP coladas externamente (viga 2S-7M(2)-B) foi semelhante ao verificado na viga 7S-R-B até ao instante em que ocorreu o destacamento da primeira faixa de mantas. Este facto traduziu-se numa diminuição da rigidez da viga 2S-7M(2)-B conforme se pode observar na Figura 4.30.c).

Os reforços com laminados de CFRP aplicados no grupo de vigas em análise permitiram um aumento da deformação média na rotura de 18.5% (o valor médio de $u_{F_{max}}$ para as vigas com laminados de CFRP foi de 6.97 mm e o valor de $u_{F_{max}}$ na viga 2S-R-B foi de 5.88 mm). Para as vigas com mantas de CFRP o valor médio de $u_{F_{max}}$ foi de 6.18 mm (aumento de 5.1% em relação à deformação na rotura da viga 2S-R-B). À semelhança do que ocorreu nas vigas da série A, os modelos com a percentagem intermédia de laminados foram, independentemente da orientação do CFRP, os que tiveram maiores valores de deformação na rotura. Este facto não ocorreu nas vigas com mantas coladas externamente. Em termos de orientação do CFRP, as vigas NSM com laminados verticais, inclinados a 45° e laminados a 60° obtiveram valores médios de $u_{F_{max}}$ de 6.80 mm, 7.05 mm e 7.07 mm, respectivamente. Comparando directamente os modelos que continham a maior percentagem de laminados de CFRP (vigas 2S-10LV-B, 2S-10LI45-B e 2S-9LI60-B) com o modelo “equivalente” em betão armado (viga 7S-R-B) é possível verificar que este apresenta uma capacidade deformacional na rotura 37% superior. Para a maior percentagem de CFRP a viga com mantas (2S-7M(2)-B) teve melhor desempenho em termos de deformação na rotura que as “equivalentes” com NSM. A relação entre o valor médio da flecha na secção de aplicação da carga referente ao parâmetro $\left(\Delta F / F^{2S-R-B}\right)_{max}$ e o valor médio da flecha na secção de aplicação da carga $u_{F_{max}}$ foi aproximadamente unitária do caso do laminados e igual a 0.86 no caso das vigas com mantas.

A análise comparativa dos resultados obtidos nas vigas com laminados (técnica NSM) e nas vigas com mantas (técnica EBR) permitiu que se façam as seguintes considerações:

- i) tendo por base o valor de F_{max} da viga não reforçada (viga 2S-R-B), as soluções com laminados conduziram a um aumento médio da capacidade máxima de carga de 30.3%. Para as soluções com mantas, o referido aumento foi de 10.4%, ou seja, 34% do aumento proporcionado pelas soluções de laminados inseridos.
- ii) tendo por base o valor de $u_{F_{max}}$ da viga não reforçada (viga 2S-R-B), as soluções com laminados conduziram a um aumento médio da deformação na rotura de 18.5%. Para as soluções com mantas a presença do reforço proporcionou um aumento de 5.1% da referida deformação, ou seja, 28% do aumento proporcionado pelas soluções de laminados inseridos. A viga 2S-4M-B foi a única reforçada com CFRP que teve um valor de $u_{F_{max}}$ inferior ao da viga 2S-R-B.
- iii) o valor médio de F_{max} para as três vigas reforçadas com a máxima percentagem de laminados de CFRP (2S-10LV-B, 2S-10LI45-B e 2S-9LI60-B) foi 90% do valor de F_{max} da viga 7S-R-B (F_{max}^{7S-R-B}), enquanto que o valor de F_{max} da viga 2S-7M(2)-B foi 79% de F_{max}^{7S-R-B} .

iv) o valor médio do parâmetro $\left(\Delta F/F^{2S-R-B}\right)_{max}$ registado nas vigas com laminados e nas vigas com mantas foi, respectivamente, 30.9% e 18.1%. O valor médio do deslocamento correspondente ao parâmetro $\left(\Delta F/F^{2S-R-B}\right)_{max}$ nas vigas com laminados foi 13.6% superior ao valor de $u_{F_{max}}$ da viga sem reforço de CFRP. Para o caso das mantas o valor médio do deslocamento correspondente ao parâmetro $\left(\Delta F/F^{2S-R-B}\right)_{max}$ foi 90% do valor de $u_{F_{max}}$ da viga sem reforço de CFRP.

v) de um modo geral as soluções de reforço com laminados de CFRP proporcionaram acréscimos de rigidez superiores aos conferidos pelas soluções de reforço com mantas de CFRP (ver Figura 4.30). Este facto reflecte o melhor controlo das fendas de corte por parte dos laminados inseridos.

Em face das considerações que se acabam de expor, e à semelhança do que aconteceu no programa experimental do Capítulo 3, é possível concluir que a técnica NSM com laminados de CFRP inseridos, quando comparada directamente com a da colagem externa de mantas de CFRP, proporcionou um melhor comportamento estrutural às vigas reforçadas. O melhor desempenho da técnica NSM foi mais evidente para as gamas de percentagem mínima e intermédia de CFRP.

4.3.4.1.2 - Modos de rotura

Como era esperado, a rotura por corte acabou por se registar em todas as vigas ensaiadas, tendo ocorrido no menor dos vãos de corte a . Nas Figuras 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34 apresentam-se pormenores da zona de rotura das vigas de referência (apenas betão armado) e das vigas com a percentagem ρ_f de laminados de CFRP mínima, intermédia e máxima, respectivamente. Na Figura 4.35 apresentam-se os modos de rotura ocorridos nas vigas com mantas de CFRP. Nas referidas figuras as linhas verticais correspondem à localização dos estribos de aço e os círculos à posição das secções onde ocorreu a rotura dos estribos durante o ensaio.

A viga C-R-B atingiu a sua capacidade máxima com a abertura excessiva da fenda diagonal de corte que se formou ao longo do ensaio. Nas vigas 2S-R-B e 7S-R-B a capacidade máxima de carga foi atingida quando ocorreu a rotura de um dos estribos que atravessavam a fenda de rotura de corte (ver Figura 4.31). A rotura dos restantes estribos deu-se após as vigas terem atingido a sua carga máxima.

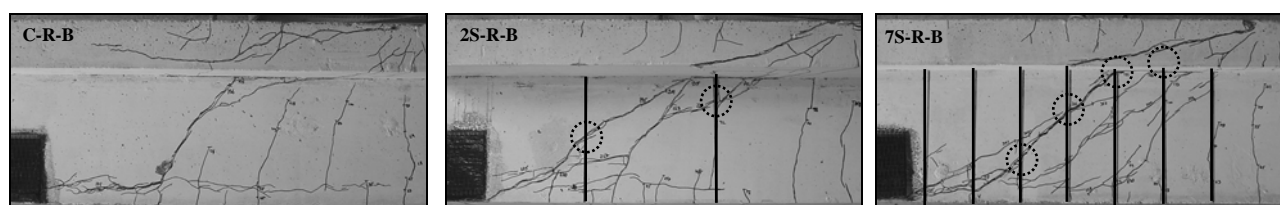


Figura 4.31 - Modos de rotura das vigas da série B sem reforço ao corte com CFRP.

O modo de rotura observado nas vigas com a menor percentagem de CFRP, para as soluções de laminados a 45° e a 60°, foi idêntico e ocorreu pela cedência da parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga, com destacamento de betão adjacente ao CFRP (ver Figura 4.32 e pormenor referente à viga 2S-4LI45-B nas Figuras 4.40.a) e 4.40.b)). O valor registado para o comprimento do laminado que se destacou e que continha betão adjacente foi de 7.5 cm, no caso da viga 2S-4LI45-B, e de 6 cm no caso da viga 2S-4LI60-B. Em ambas as vigas a rotura dos dois estribos de aço colocados no vão de corte a ocorreu após as vigas terem atingido a carga máxima. No que diz respeito à viga 2S-4LV-B, a sua capacidade máxima resistente foi atingida quando se deu a rotura de um dos estribos que atravessava a fenda de rotura de corte, posteriormente à ocorrência da cedência dos laminados intersectados pela referida fenda. O destacamento prévio dos laminados é visível na curva de comportamento da viga 2S-4LV-B representada na Figura 4.30 - quebra da capacidade resistente para um deslocamento na secção de aplicação da carga de cerca de 4.7 mm. Este facto conjugado com a não ortogonalidade dos laminados verticais, relativamente às fendas diagonais de corte, e a sua distribuição pouco homogénea (sobreposição de um laminado com um estribo) em relação à posição dos estribos de aço justificam o menor desempenho que esta solução de reforço teve quando comparado com o das soluções de laminados inclinados. Na Figura 4.36 apresenta-se, a título de exemplo de vigas com a menor percentagem de laminados de CFRP testada, o registo de alguns instantes do ensaio da viga 2S-4LI45-B. No anexo D desta dissertação encontra-se o mesmo tipo de registo para as vigas 2S-4LV-B e 2S-4LI60-B.

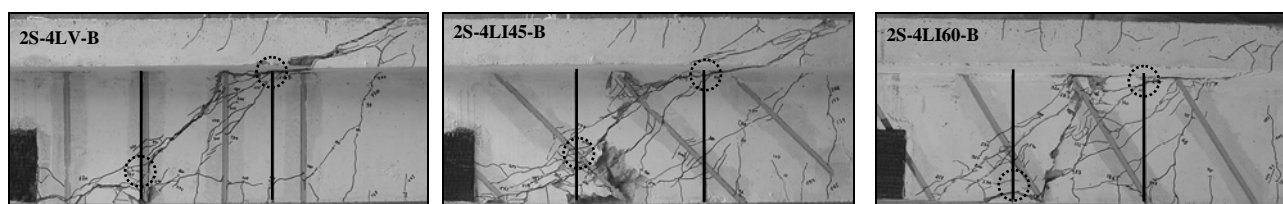


Figura 4.32 - Modos de rotura das vigas da série B com a percentagem mínima de CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$).

Na Figura 4.37 apresenta-se, a título de exemplo de vigas com a percentagem intermédia de laminados de CFRP testada, o registo de alguns instantes do ensaio da viga 2S-7LI45-B. No anexo D desta dissertação encontra-se o mesmo tipo de registo para as vigas 2S-7LV-B e 2S-6LI60-B. Com o aumento da percentagem de CFRP foi notória a existência de uma redistribuição de esforços entre os vários elementos resistentes ao esforço transversal que foram atravessados pela fenda de rotura de corte. Um exemplo desta constatação é o caso da viga 2S-7LI45-B (ver Figura 4.37 e os pormenores das Figuras 4.40.d) e 4.40.e)). Cerca dos 415 kN houve a cedência, pelo betão, da parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga. A partir desse instante, o terceiro laminado, a contar da secção de aplicação da carga, passou a estar mais solicitado (redistribuição de

esforços). Com este novo cenário, e com as fendas de corte existentes devidamente controladas, ocorreu, para uma carga de cerca dos 414 kN, uma nova fenda diagonal de corte na zona compreendida entre o apoio e a fenda de corte que, até então, estava mais próximo do apoio. Para um nível de carregamento correspondente a 420 kN houve cedência, pelo betão, da parte superior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga, o que originou, desde logo, um acréscimo de mobilização no laminado vizinho (quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga). A carga máxima da viga 2S-7LI45-B foi atingida quando se deu a cedência da parte superior deste laminado.

Em relação à viga 2S-6LI60-B a carga máxima foi atingida imediatamente antes de se dar a cedência da parte superior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga (face oposta à representada na Figura 4.33). Antes da viga atingir a sua capacidade máxima resistente verificou-se a cedência da parte superior de dois laminados: o primeiro para uma carga de 367 kN e que estava inserido na mesma posição, mas na outra face da viga (representada na Figura 4.33), do laminado que esteve na origem da carga máxima da viga; o segundo para uma carga de 379 kN e que estava posicionado à direita do laminado que esteve na origem da carga máxima da viga. A capacidade de carga da viga 2S-7LV-B aumentou até ao instante em que ocorreu o escorregamento da parte inferior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga. Nesta viga ocorreram duas fendas diagonais de corte paralelas, cada uma atravessada por dois laminados e um estribo. Um aspecto que se pode verificar no comportamento da viga 2S-7LV-B relaciona-se com a forma como cederam os dois laminados que estavam posicionados entre os dois estribos de aço (ver Figura 4.33 e pormenor da Figura 4.40.g)): o terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga, que com um comprimento de amarração de 12.5 cm, cedeu por deslizamento e o quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga, que com um comprimento de amarração de 8.0 cm, cedeu pelo betão. Estas constatações revelam que o grau de fixação dos laminados altera o modo como se dá a sua cedência. Com efeito, estando na presença do mesmo tipo de betão, para comprimentos de amarração inferiores a um determinado valor a cedência ocorre pela fractura do betão (existe uma quantidade de betão adjacente ao comprimento do laminado que se destacou), enquanto para comprimentos de amarração superiores ao referido valor a cedência dos laminados ocorre ao nível da ligação como foi o caso do deslizamento do laminado. Como situação limite pode ocorrer a rotura do CFRP.

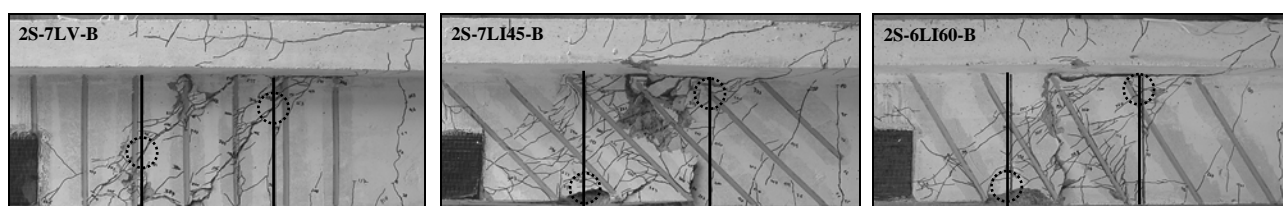


Figura 4.33 - Modos de rotura das vigas da série B com a percentagem intermédia de CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$).

Na Figura 4.37 apresenta-se, a título de exemplo de vigas com a maior percentagem de CFRP testada, o registo de alguns instantes do ensaio da viga 2S-10LI45-B. No anexo D desta dissertação encontra-se o mesmo tipo de registo para as vigas 2S-9LI60-B e 2S-10LV-B. A capacidade máxima de carga da viga 2S-10LI45-B foi alcançada antes da cedência da parte superior do quinto laminado a contar da secção de aplicação da carga. Após a cedência deste laminado, em ambas as faces da viga, a carga manteve-se a níveis elevados. A cedência da parte inferior do mesmo laminado provocou uma diminuição da carga para os 400 kN. A proximidade existente entre laminados motivou o destacamento gradual de uma “parede de betão contendo CFRP” o qual originou uma diminuição gradual da capacidade de carga da viga (ver Figura 4.40.h)). A capacidade máxima resistente da viga 2S-9LI60-B foi alcançada quando se deu a cedência da parte superior do quinto laminado a contar da secção de aplicação da carga. Este laminado tinha um comprimento de aderência pequeno de valor igual a 4.5 cm. Um aspecto relevante que deve ser tido em conta no comportamento desta viga é que a sua carga máxima (412.7 kN) ocorreu para um deslocamento da secção de aplicação da carga de valor igual a 6.44 mm e que, após F_{max} , para um valor da carga de 400 kN (97% carga máxima), altura em que ocorreu a cedência do laminado colocado na mesma posição daquele que originou a carga máxima da viga (outra face da viga) o deslocamento da secção de aplicação da carga era de 8 mm (1.25 vezes superior ao deslocamento $u_{F_{max}}$). A capacidade resistente máxima da viga 2S-10LV-B ocorreu imediatamente antes de se dar o escorregamento do sexto laminado a contar da secção de aplicação da carga. Previamente, verificou-se a cedência de dois laminados: a parte inferior do sétimo laminado a contar da secção de aplicação da carga (lado contrário ao da fotografia da Figura 4.34) aos 372 kN e a parte superior do quinto laminado a contar da secção de aplicação da carga (lado da fotografia apresentada na Figura 4.34) aos 391 kN.

A análise das Figuras 4.32 a 4.34 permite também observar o padrão de fendilhação no vão de corte a das vigas após os respectivos ensaios. A difusividade do padrão aumentou com a percentagem de CFRP aplicada, o que teve consequência nos modos de rotura observados. De entre as várias vigas ensaiadas, a viga 2S-10LI45-B foi a que apresentou o padrão de fendilhação mais difuso.

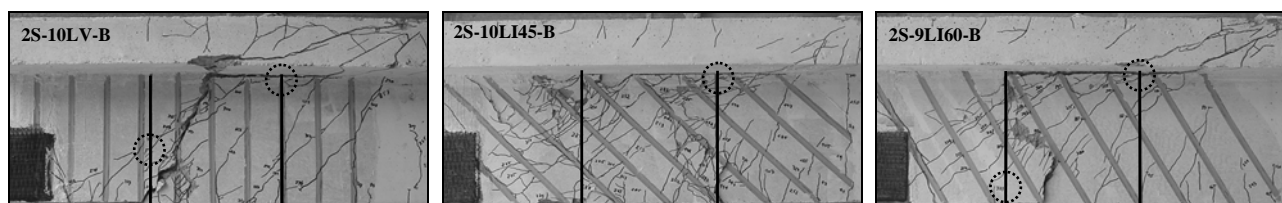


Figura 4.34 - Modos de rotura das vigas da série B com a percentagem máxima de CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$).

Relativamente às vigas reforçadas ao corte com mantas coladas externamente, o modo de rotura foi o destacamento do CFRP (Figura 4.35 e Figuras 4.40.c), 4.40.f) e 4.40.i)). A carga máxima da viga com a menor percentagem de reforço (2S-4M-B) foi atingida imediatamente antes de se dar o destacamento da segunda manta a contar da secção de aplicação da carga (manta atravessada por duas fendas de corte, facto que penalizou o grau de fixação da manta e promoveu um destacamento mais prematuro). No caso da viga 2S-7M(1)-B a capacidade de carga máxima ocorreu imediatamente antes do destacamento da sexta manta a contar da secção de aplicação da carga. Antes desta ocorrência, verificou-se o destacamento da quarta (em primeiro lugar) e da quinta manta a contar da secção onde a carga foi aplicada. Na curva de comportamento desta viga (Figura 4.30.b) é possível observar os destacamentos das faixas de manta ocorridos até ser atingida a carga máxima. À semelhança da viga 2S-7M(1)-B, na viga 2S-7M(2)-B, antes de ser atingida a carga máxima, verificou-se a desactivação, por destacamento, de duas faixas de manta: a quarta (em primeiro lugar) e a quinta faixa a contar da secção onde a carga foi aplicada. A capacidade máxima resistente desta viga foi alcançada imediatamente antes de ocorrer o destacamento da sexta manta a contar da secção de aplicação da carga. Na Figura 4.39 apresenta-se, a título de exemplo de vigas reforçadas ao corte com mantas CFRP, o registo de alguns instantes do ensaio da viga 2S-7M(2)-B. No anexo D desta dissertação encontra-se o mesmo tipo de registo para as vigas 2S-4M-B e 2S-7M(1)-B.

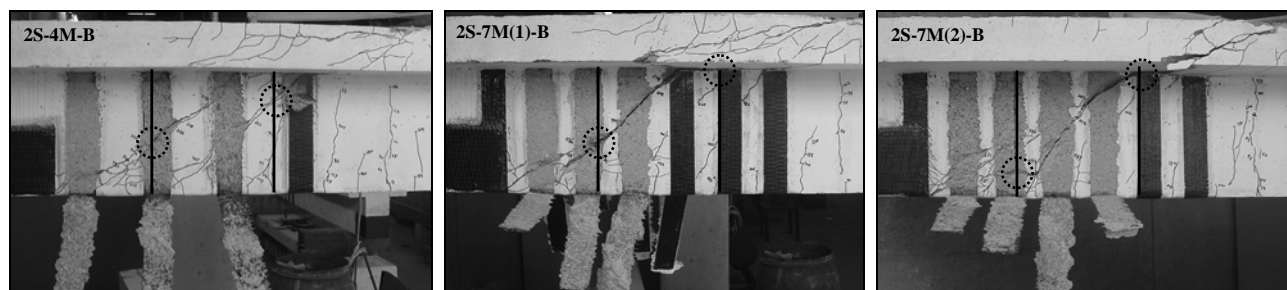


Figura 4.35 - Modos de rotura das vigas da série B com mantas de CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$).

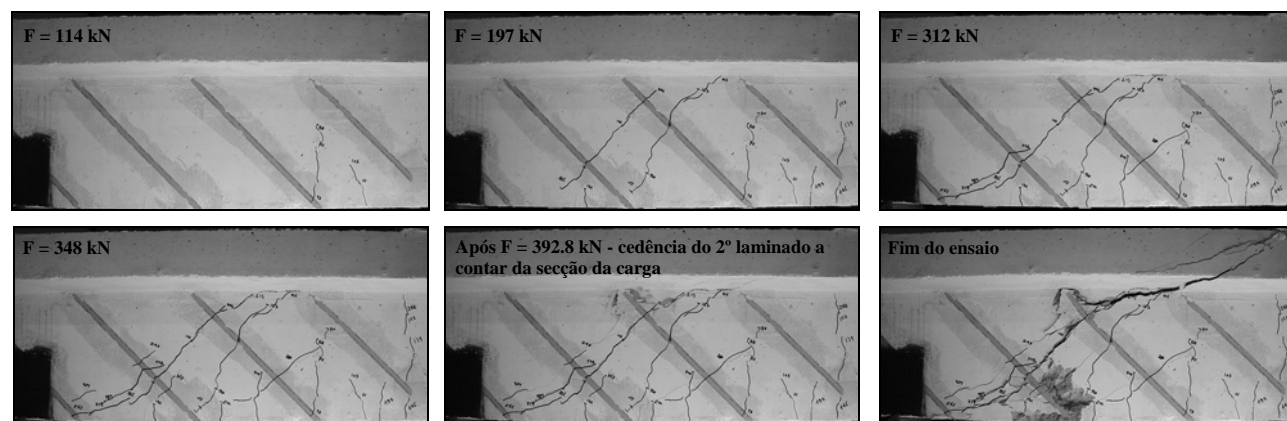


Figura 4.36 - Sequência do ensaio da viga 2S-4LI45-B (carga máxima = 392.8 kN).

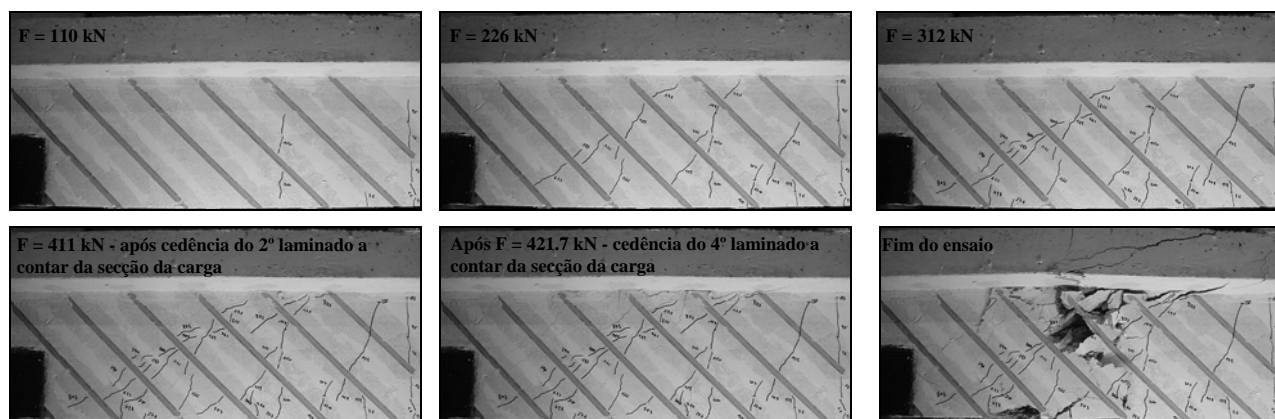


Figura 4.37 - Sequência do ensaio da viga 2S-7LI45-B (carga máxima = 421.7 kN).

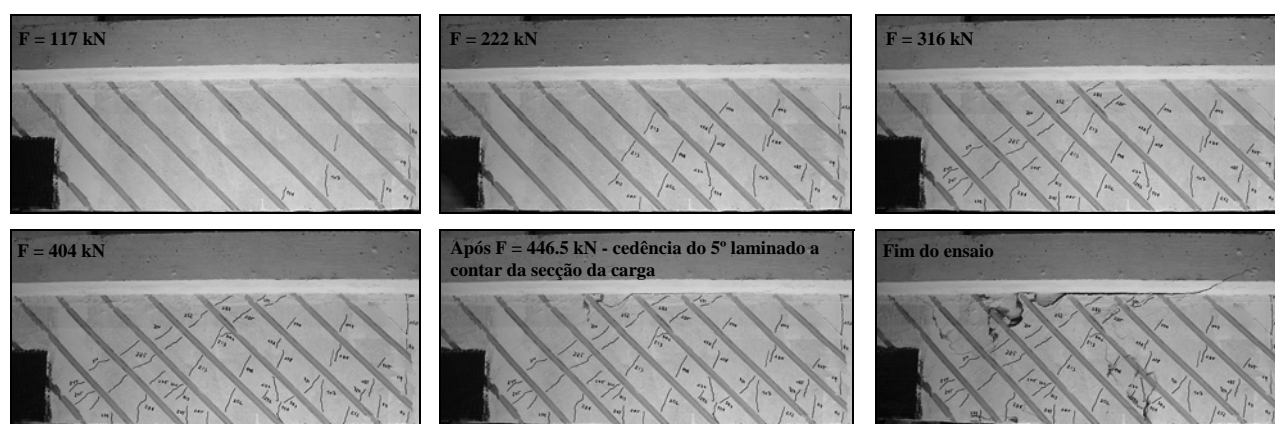


Figura 4.38 - Sequência do ensaio da viga 2S-10LI45-B (carga máxima = 446.5 kN).

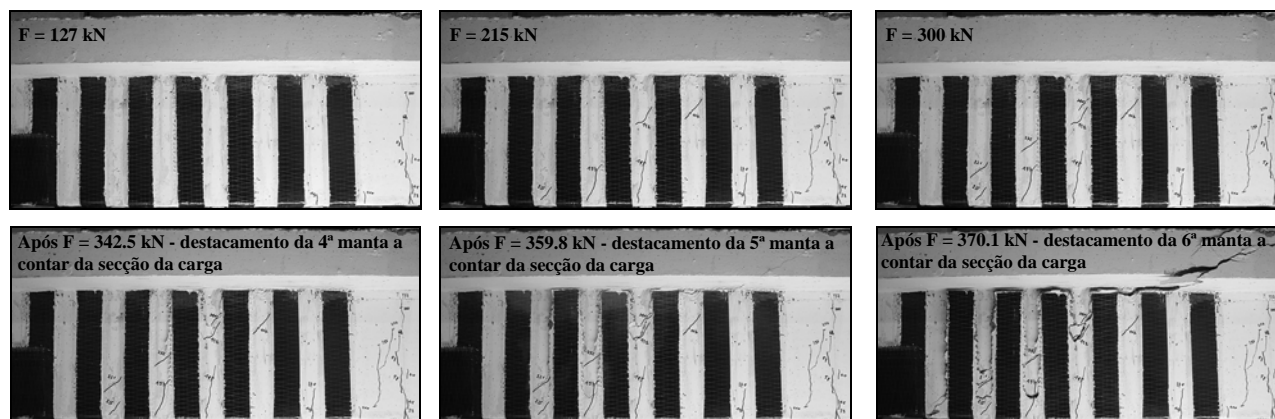


Figura 4.39 - Sequência do ensaio da viga 2S-7M(2)-B (carga máxima = 370.1 kN).

O relato dos modos de rotura das vigas reforçadas ao corte com CFRP permite constatar que no caso da técnica da inserção de laminados de CFRP, à semelhança do que já foi observado nas vigas da série A, a forma como a rotura das vigas ocorre é condicionada pela percentagem de CFRP (ver as Figuras 4.40.j), 4.40.k) e 4.40.l)). Tal facto não se verificou no caso do reforço ao corte por colagem externa (ver as Figuras 4.40.c), 4.40.f) e 4.40.i)). Para as vigas reforçadas com esta técnica de reforço o modo de rotura foi único e correspondeu ao destacamento isolado das mantas de CFRP.

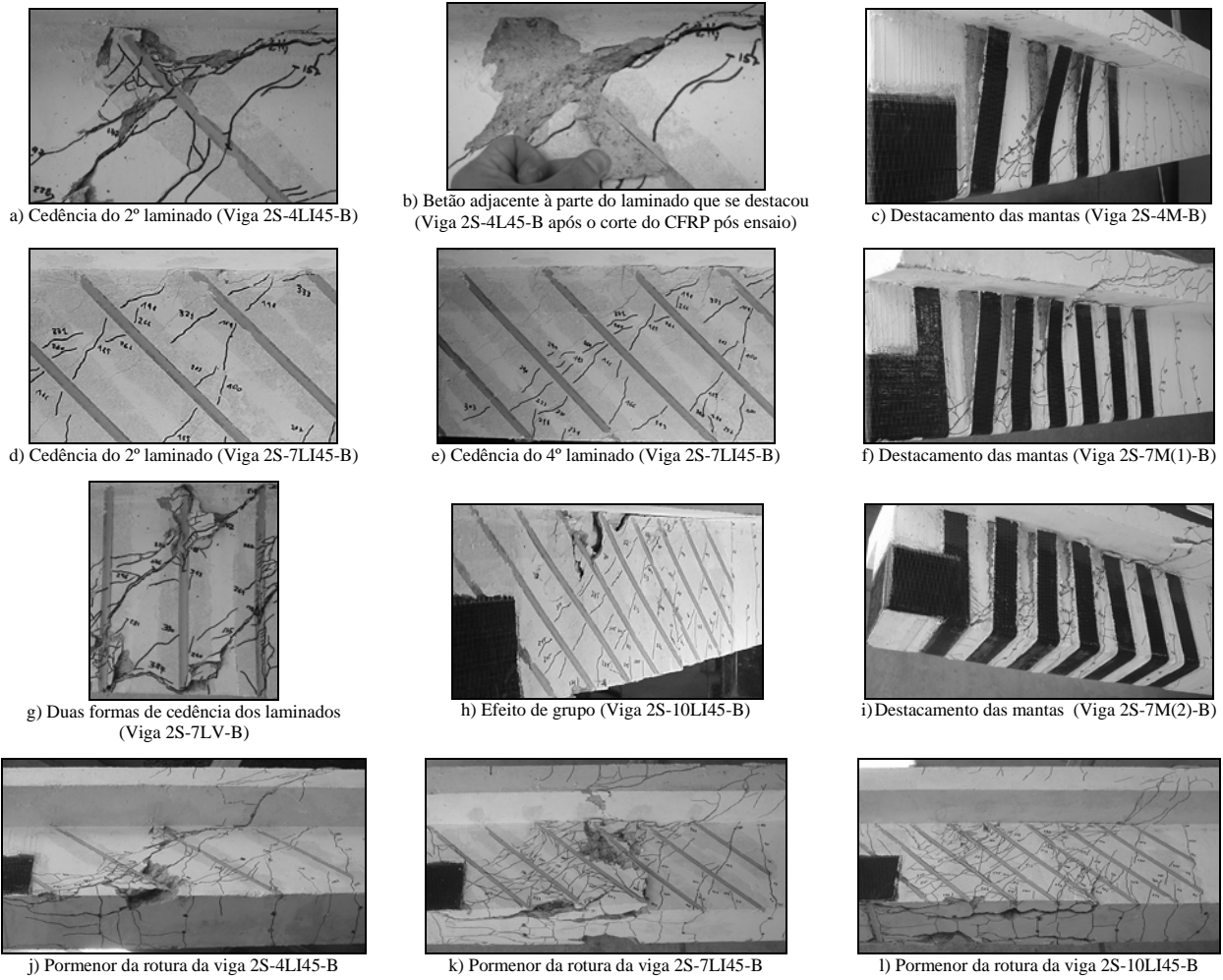


Figura 4.40 - Vários pormenores das vigas da série B reforçadas com CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$).

4.3.4.1.3 - Efeito da percentagem e da orientação do CFRP

Na Figura 4.41 apresenta-se, para as várias soluções de reforços com CFRP (NSM e EBR) aplicadas nas vigas da série B com $\rho_{sw} = 0.10\%$, a relação entre a percentagem de CFRP (ρ_f) e a eficácia do reforço em termos de acréscimo de carga máxima ($\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-B}$).

A análise da Figura 4.41 permite constatar que, independentemente da percentagem de laminados de CFRP, a solução a 45° foi a mais eficaz das três orientações testadas. Além disso, é possível verificar que as soluções com laminados a 60° tiveram melhor desempenho que as soluções de laminados verticais. O ganho de resistência proporcionado pelos reforços de CFRP adoptados foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, o aumento da percentagem ρ_f garantiu um maior aumento da capacidade de carga. Esta constatação foi comum a ambas as técnicas de reforço. De entre as duas técnicas de reforço com CFRP, a da inserção de laminados foi mais eficaz que a da colagem externa, independente da percentagem e da orientação dos laminados de CFRP. Das nove

soluções de reforço NSM, apenas a referente à menor percentagem de laminados verticais é que não conseguiu proporcionar ao reforço um grau de eficácia superior ao originado pela solução de mantas com melhor desempenho (maior percentagem de CFRP).

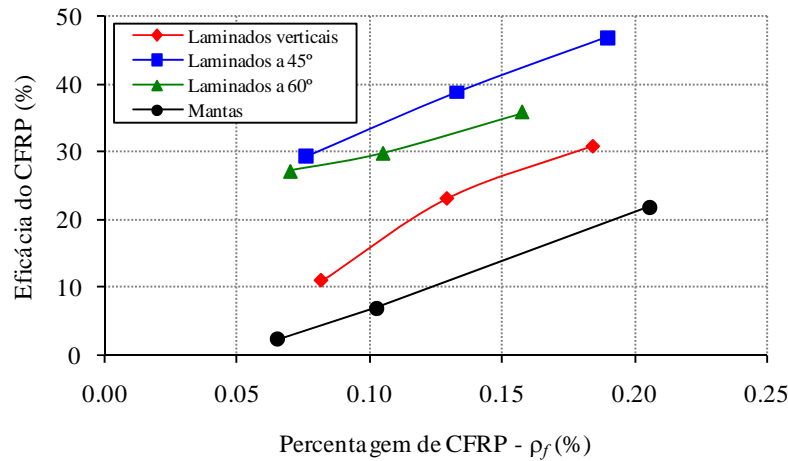


Figura 4.41 - Eficácia do reforço vs percentagem de CFRP em termos de $\Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-B}$.

4.3.4.1.4 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais

Na Tabela 4.10 apresentam-se, para cada viga reforçada, os valores das extensões nos quatro extensómetros colados em cada um dos CFRP instrumentados (CFRP A e CFRP B) correspondentes à carga máxima (F_{max}) e, quando a extensão máxima nos CFRP se verificou para uma carga inferior a F_{max} , indica-se entre parêntesis curvos os valores registados nos extensómetros nesse instante (ver Figuras 4.7, 4.27 e 4.28). O CFRP A era o que estava mais próximo da secção de aplicação da carga, enquanto o CFRP B era o que estava mais próximo do apoio. Além do que foi referido, na Tabela 4.10 apresenta-se para cada viga reforçada, o valor da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados antes das vigas atingirem a rotura (ε_{CFRP}^{max}), assim como, o valor médio das extensões máximas registadas nos dois CFRP instrumentados (ε_{CFRP}^{max})_m. A Figura 4.42 ilustra a relação entre a percentagem de CFRP (ρ_f) e a extensão máxima no CFRP (ε_{CFRP}^{max}) e a relação entre a percentagem de CFRP (ρ_f) e a extensão (ε_{CFRP}^{max})_m.

Da análise da extensometria é possível verificar que o valor máximo das extensões registadas nas vigas reforçadas usando a técnica NSM variou entre os 5.6‰ (2S-4LV-B) e os 10.8‰ (viga 2S-4LI45-B). Em termos médios, os valores máximos das extensões registadas nos dois laminados (A e B) variou entre os 5.5‰ (2S-4LV-B) e os 10.3‰ (viga 2S-4LI45-B). De um modo geral, tal como pode ser observado na Figura 4.42, os valores mais elevados das extensões no CFRP registaram-se nas vigas com a menor percentagem de CFRP, enquanto os valores mais baixos ocorreram nas vigas

reforçadas com as percentagens mais elevadas CFRP. Esta constatação está associada ao facto, já referido, do padrão de fendilhação se tornar mais difuso e repartido à medida que a percentagem de CFRP aumenta. Com efeito, para pequenas percentagens de reforço, o número de fendas de corte que surgem e que atravessam o reduzido número de laminados existentes é diminuto, podendo assim originar elevadas concentrações de extensões nas secções dos laminados atravessadas pelas referidas fendas. O número reduzido de laminados e o facto do betão não se apresentar muito fendilhado (poucas fendas de corte) potencia a existência de consideráveis comprimentos de amarração dos CFRP, o que proporciona a estes níveis de ancoragem elevados, aos quais estão necessariamente associados elevados valores das extensões no CFRP. Com o aumento da percentagem de CFRP, ou seja, do número de laminados existentes, a probabilidade de aparecerem mais fendas de corte aumenta. Isto tem consequências, essencialmente, a dois níveis: ao nível do grau de fixação do CFRP, que sendo atravessado por um maior número de fendas diminui os comprimentos de amarração, podendo assim promover uma cedência antecipada do reforço de CFRP; ao nível da distribuição das extensões no CFRP, pois existindo um maior número de fendas a atravessar o CFRP deixa de existir a concentração de extensões anteriormente referida (mais fendas com menos abertura) passando a distribuição a ser mais uniforme.

A diminuição dos valores máximos das extensões registadas nos CFRP instrumentados com o aumento da percentagem de CFRP, que anteriormente se referiu, não se verificou para o caso das vigas reforçadas com laminados verticais (as extensões aumentaram com a percentagem de CFRP). No caso da viga com a menor percentagem de CFRP (2S-4LV-B), os reduzidos comprimentos de amarração dos laminados atravessados pela fenda de rotura de corte minimizaram o grau de mobilização do reforço. A par disto, e tal como já foi referido, a distribuição do CFRP relativamente à posição dos estribos de aço não conduziu a uma solução de reforço homogénea, pelo que não ocorreu uma mobilização eficaz do reforço de CFRP. Na viga 2S-7LV-B o laminado que condicionou a carga máxima obtida não estava instrumentado (terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga) e, assim, os valores máximos das extensões registadas podem não representar a máxima mobilização do CFRP.

Tendo em consideração os valores da Tabela 4.10, em termos de orientação dos laminados, a solução a 60° foi a que mais mobilizou a capacidade resistente do CFRP. Com efeito, considerando a máxima extensão ε_{CFRP}^{max} por viga para as três soluções de laminados a 60° verifica-se que o seu valor médio foi de 9.4‰, ou seja, 59% da extensão máxima obtida nos ensaios de tracção directa dos laminados (16.0‰ - Tabela 4.8). As soluções de laminados verticais e de laminados inclinados a 45° conduziram, em termos médios, a uma mobilização do reforço de cerca de 44% (extensão de 7.0‰) e 55% (extensão de 8.8‰), respectivamente.

Tabela 4.10 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP (série B - $\rho_{sw} = 0.10\%$).

Viga	CFRP	$\varepsilon_{Ext.1}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.2}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.3}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.4}$ [‰]	ε_{CFRP}^{max} [‰]	$(\varepsilon_{CFRP}^{max})_m$ [‰]
2S-4LV-B	A*	1.99 (5.55)	2.24 (3.00)	0.10 (0.12)	0.00 (0.00)	5.55	5.5
	B*	0.04 (0.05)	0.86 (1.99)	1.86 (5.35)	0.00 (3.61)	5.35	
2S-7LV-B	A	7.66	6.58	1.08	1.91	7.66	7.1
	B*	0.28 (0.23)	5.10 (4.99)	6.33 (6.58)	3.92 (2.52)	6.33 (6.58)	
2S-10LV-B	A*	5.31 (7.69)	4.95 (6.39)	0.41 (0.48)	1.09 (1.06)	7.69	7.5
	B	3.98	5.23	7.25	7.18	7.25	
2S-4LI45-B	A	10.8	3.85	6.30	3.83	10.80	10.3
	B	0.23	6.64	9.82	3.57	9.82	
2S-7LI45-B	A	8.49	7.77	7.38	4.62	8.49	8.0
	B	0.12	5.30	7.45	4.01	7.45	
2S-10LI45-B	A	7.15	6.12	5.45	4.23	7.15	6.9
	B	6.64	6.48	5.36	3.79	6.64	
2S-4LI60-B	A	4.84	9.86	9.69	3.46	9.86	9.8
	B	-	-	9.65	3.90	9.65	
2S-6LI60-B	A	9.91	8.88	8.00	1.55	9.91	8.7
	B*	0.51 (0.40)	7.35 (7.40)	7.19 (6.45)	3.70 (2.31)	7.40	
2S-9LI60-B	A	8.03	8.51	6.38	4.15	8.51	7.9
	B	0.54	7.32	6.19	5.15	7.32	
2S-4M-B**	A*	(-) (-)	3.69 (3.51)	3.40 (3.89)	1.71 (7.90)	7.90	6.9
	B	2.91	4.22	5.87	4.59	5.87	
2S-7M(1)-B**	A*	1.80 (4.16)	(-) (4.65)	(-) (1.97)	0.59 (0.58)	4.65	5.7
	B*	0.01 (3.75)	(-) (1.99)	-	0.18 (6.78)	6.78	
2S-7M(2)-B**	A*	0.02 (3.06)	0.03 (2.76)	(-) (3.73)	(-) (4.06)	4.06	4.5
	B*	(-) (-)	0.03 (4.19)	(-) (4.16)	(-) (4.85)	4.85	

* Os valores das extensões entre parênteses referem-se à carga para a qual ocorreu a máxima extensão no CFRP instrumentado antes da carga máxima (296.3 kN no CFRP A da viga 2S-4LV-B, 323.1 kN no CFRP B da viga 2S-4LV-B, 361.5 kN no CFRP B da viga 2S-7LV-B, 390.0 kN no CFRP A da viga 2S-10LV-B, 379.3 kN no CFRP B da viga 2S-6LI60-B, 308.9 kN no CFRP A da viga 2S-4M-B, 320.0 kN no CFRP A da viga 2S-7M(1)-B, 321.0 kN no CFRP B da viga 2S-7M(1)-B, 340.1 kN no CFRP A da viga 2S-7M(2)-B, 359.4 kN no CFRP B da viga 2S-7M(2)-B).

** A designação (-) refere-se ao facto da extensão registada no extensómetro para a carga em questão apresentar um valor negativo, o que significa que a manta está desactivada.

Em relação às vigas reforçadas ao corte com mantas coladas externamente, os valores máximos das extensões no CFRP registaram-se para cargas inferiores à carga máxima. Os referidos valores variaram entre os 4.9‰ (2S-7M(2)-B) e os 7.9‰ (viga 2S-4M-B), enquanto os valores médios máximos das duas mantas instrumentadas (A e B) variaram entre os 4.5‰ (2S-7M(2)-B) e os 6.9‰ (viga 2S-4M-B). Comparando estes valores com os das extensões registadas nos laminados das vigas

NSM verifica-se que os primeiros foram bastante inferiores, ou seja, de entre as técnicas de reforço ao corte com CFRP testadas, a técnica NSM foi aquela que conduziu a uma maior mobilização do CFRP, ou seja, a um melhor aproveitamento do material de reforço.

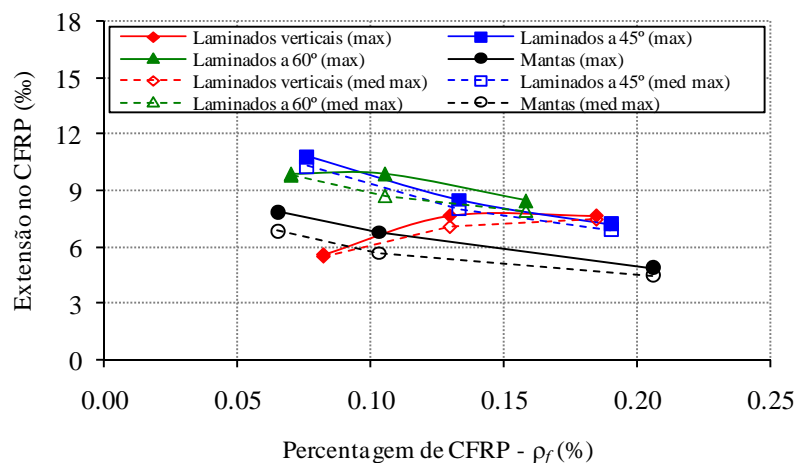
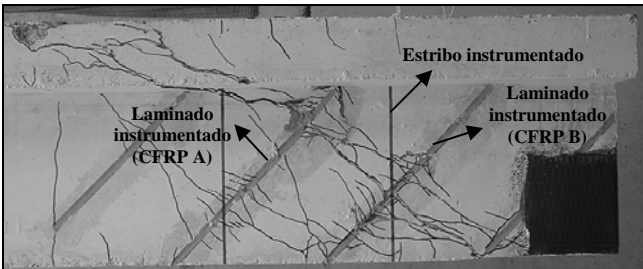
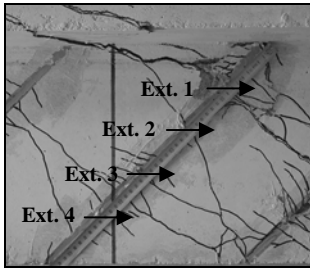
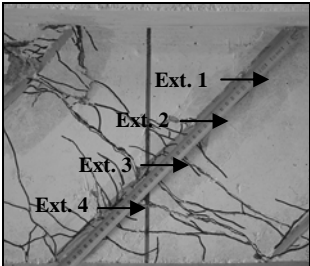
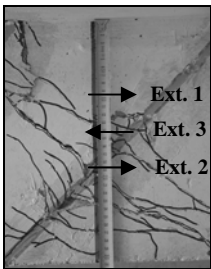


Figura 4.42 - Extensões no CFRP vs percentagem de CFRP.

Por forma a ilustrar a variação das extensões registadas, durante o processo de carregamento de uma viga até ao instante em que atinge a sua capacidade de carga máxima, nos laminados e no estribo de aço que continham extensómetros eléctricos, na Tabela 4.11 apresentam-se valores das referidas extensões para diferentes níveis de carga da viga 2S-4LI45-B. O valor máximo da extensão registada no CFRP A foi de 10.8‰ (Ext.1) e no CFRP B foi de 9.8‰ (Ext.3). Os referidos extensómetros foram os mais solicitados por serem os que estavam, para cada um dos laminados instrumentados, mais próximos da fenda de rotura de corte. Por outro lado, o Ext. 1 do CFRP B registou os valores mais baixos de extensão por estar colado numa secção distante da fenda de corte. Na Tabela 4.11 apresentam-se valores das extensões registadas no estribo instrumentado da viga 2S-4LI45-B e da viga 2S-R-B para três níveis de carga, sendo possível constatar que o estribo da viga sem reforço de CFRP apresentava extensões mais elevadas. Esta ocorrência deveu-se ao facto do reforço de CFRP atrasar a progressão da abertura de fenda.

Na Figura 4.43 está registada a variação das extensões nos laminados instrumentados ao longo da altura da alma da viga. A análise desta figura permite identificar claramente a zona dos referidos laminados que foi intersectada pela fenda de rotura de corte (junto ao Ext.1 no CFRP A e junto ao Ext.3 no CFRP B). Além disso, é também possível verificar que no CFRP A junto ao Ext.3 ocorreu uma fenda de corte bastante activa.

Tabela 4.11 - Variação das extensões no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-4LI45-B (valores das extensões em ‰).

Descrição								
Reforço ao corte com CFRP constituído por quatro laminados inclinados a 45° em cada face da viga.								
A carga máxima atingida foi de $F_{max} = 392.8$ kN imediatamente antes da cedência da parte superior do segundo laminado a contar da secção da carga.								
CFRP A		Ext.	F =200 kN	F =250 kN	F =300 kN	F =350 kN	F =380 kN	F =392.8 kN
		1	1.9	4.9	6.2	8.3	10.1	10.5
		2	2.2	2.3	2.6	3.0	3.5	3.8
		3	0.1	0.2	2.3	4.3	5.8	6.3
		4	0.5	0.9	1.4	2.4	3.9	3.8
CFRP B		Ext.	F =200 kN	F =250 kN	F =300 kN	F =350 kN	F =380 kN	F =392.8 kN
		1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
		2	0.1	0.3	0.4	1.6	5.3	6.6
		3	3.1	5.7	7.5	8.7	9.4	9.8
		4	0.4	1.1	1.9	2.6	3.2	3.6
Estribo de aço		Ext.	F =200 kN	F =250 kN	F =300 kN	F =350 kN	F =380 kN	F =392.8 kN
		1 ^a	0.3 (0.3)	1.2 (2.2)	1.8 (2.3)	2.4	2.5	2.6
		2 ^a	1.2 (0.9)	2.4 (3.5)	4.3 (5.2)	*	*	*
		3 ^b	-	-	-	-	-	-

Nota: Na identificação da localização dos extensómetros colados no estribo a seta que aponta para a esquerda indica que o extensómetro está do lado oposto ao representado na fotografia. ^a Valores entre parêntesis referem-se à viga 2S-R-B cujo valor de F_{max} foi igual a 303.8 kN. ^b Este extensómetro não funcionou na viga com CFRP. * De acordo com a Figura 4.45 ocorreu um alívio da extensão no Ext.2.

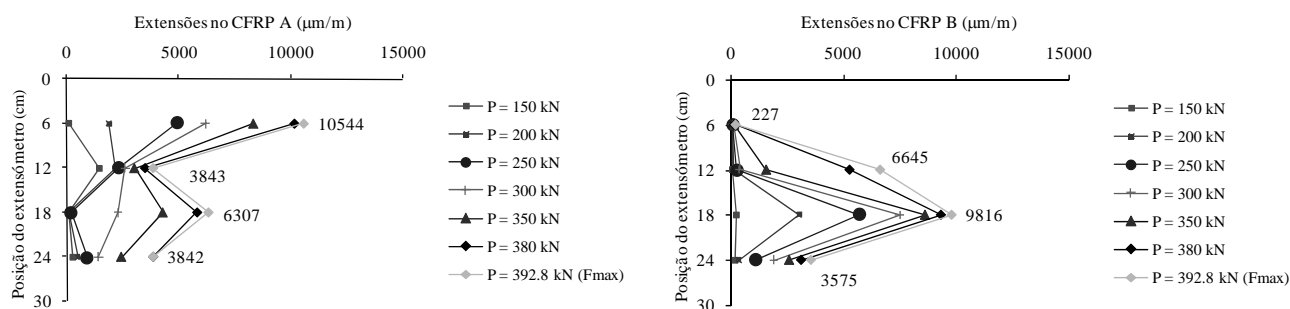


Figura 4.43 - Variação da extensão nos CFRP instrumentados ao longo da altura da viga 2S-4LI45-B.

Nas Figuras 4.44 e 4.45 apresenta-se, respectivamente, a variação ocorrida durante o ensaio da viga 2S-4LI45-B das extensões nos laminados e estribo de aço que foram instrumentados. Estas figuras permitem constatar que numa fase inicial do carregamento os elementos resistentes ao esforço transversal não foram activados. Tal ocorreu apenas no instante em que foram atravessados por uma fenda de corte. O primeiro laminado solicitado foi o CFRP A (Ext.2) para uma carga ligeiramente superior aos 100 kN (formação de uma fenda junto ao Ext.2 abaixo da fenda de rotura de corte). As extensões registadas no referido extensómetro aumentaram significativamente até ao instante em que ocorreu uma fenda de corte (a de rotura) nas proximidades do Ext.1 (CFRP A) o que motivou neste uma forte variação do valor da extensão. A partir deste nível de carregamento os valores das extensões registadas em Ext.1 subiram significativamente o que não aconteceu no Ext.2. A última fenda de corte que foi referida também atravessou o CFRP B na proximidade do Ext.3, daí o aumento progressivo das extensões observado. O aumento do carregamento provocou o aparecimento de uma nova fenda de corte nas proximidades do Ext.3 do CFRP A (cerca dos 280 kN), o que motivou neste uma variação significativa dos valores da extensão registada (no Ext.4 também foi notório o aparecimento da referida fenda). A análise da Figura 4.44 também permite verificar que o CFRP B foi solicitado por uma nova fenda de corte nas proximidades do Ext.2 e que motivou um ligeiro alívio na zona dos Ext.3 e Ext.4. Na Figura 4.45 é possível verificar que o aço do estribo instrumentado atingiu a cedência.

A informação do registo das extensões nos laminados e estribos instrumentados das restantes vigas da série B está apresentada no anexo C desta dissertação. A análise dos dados referentes à extensometria colocada nos estribos permitiu concluir que em todas as vigas com CFRP a carga máxima foi atingida com as armaduras transversais instrumentadas com extensómetros em cedência.

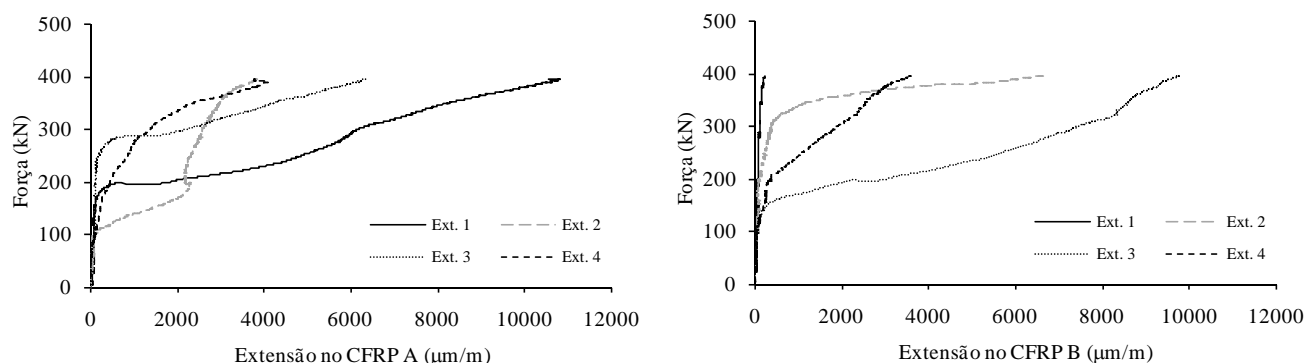


Figura 4.44 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima (viga 2S-4LI45-B).

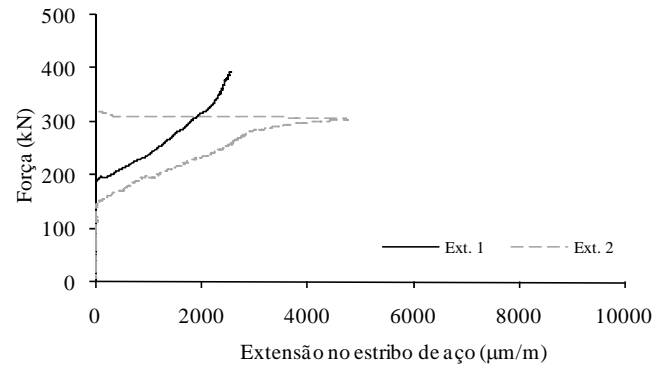


Figura 4.45 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 2S-4LI45-B).

4.3.4.2 - Vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$ no vão de corte a

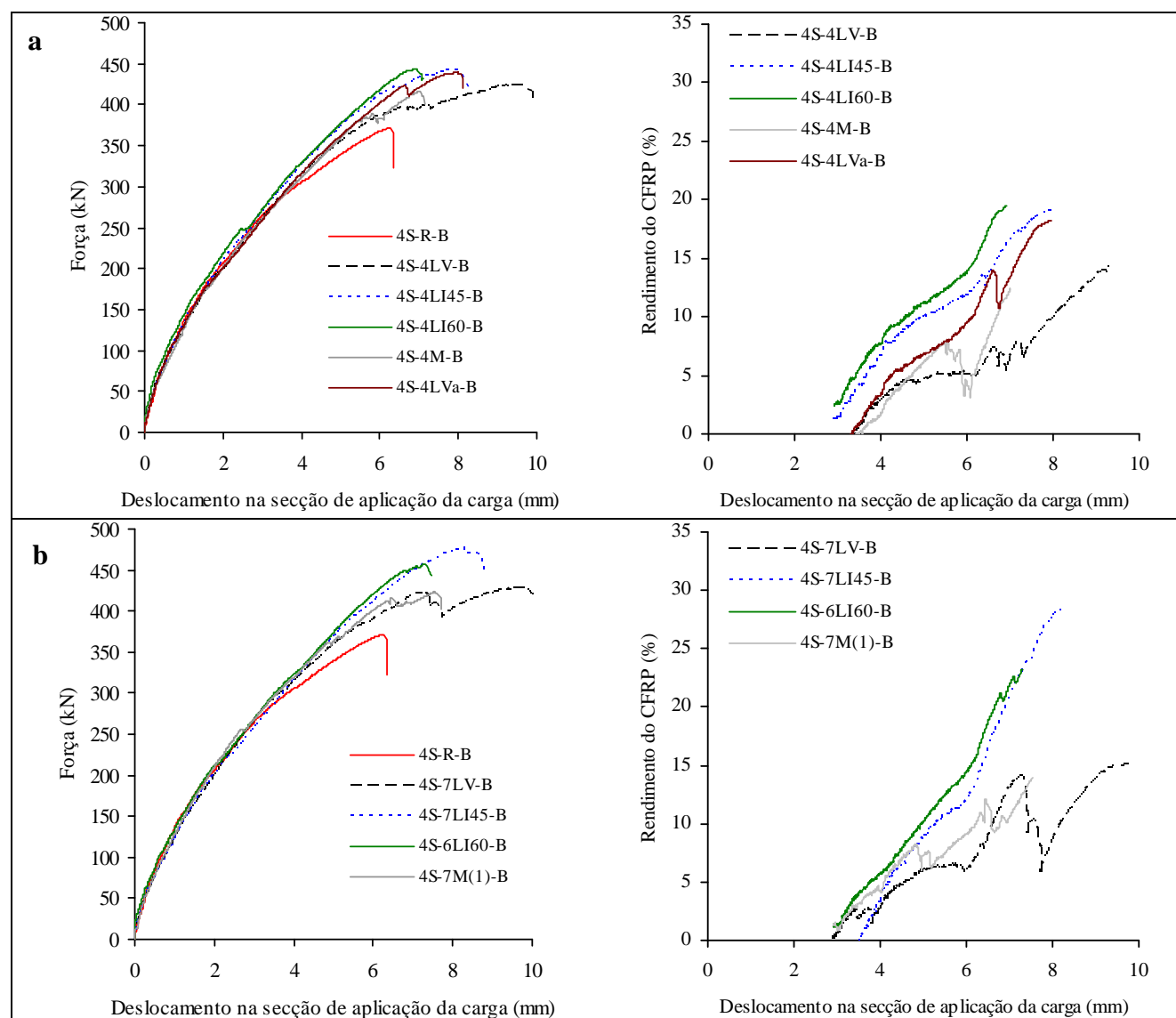
4.3.4.2.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura

Na Tabela 4.12 apresentam-se os valores da força máxima (F_{max}) e da respectiva flecha na secção de aplicação da carga ($u_{F_{max}}$) obtidos em cada uma das vigas da série B com $\rho_{sw} = 0.17\%$ no vão de corte a . Atribuindo a designação F_{max}^{4S-R-B} à carga máxima da viga 4S-R-B (viga com $\rho_{sw} = 0.17\%$ sem reforço de CFRP), determinaram-se os valores do factor $\Delta F_{max} / F_{max}^{4S-R-B}$ indicados na Tabela 4.12 ($\Delta F_{max} = F_{max} - F_{max}^{4S-R-B}$). Neste grupo de vigas o valor do parâmetro $(\Delta F / F^{4S-R-B})_{max}$ coincidiu com o de $\Delta F_{max} / F_{max}^{4S-R-B}$, ou seja, o máximo acréscimo de carga proporcionado pelas várias soluções de reforço testadas foi alcançado para a situação de carga máxima das vigas com CFRP. As respostas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga e a relação $\Delta F / F^{4S-R-B}$ vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com CFRP estão apresentadas na Figura 4.46.

A análise dos dados da Tabela 4.12 e da Figura 4.46 permite constatar que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte das vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$, independentemente da percentagem e da orientação do CFRP, proporcionou aumentos de rigidez, de deformação máxima na rotura e de capacidade máxima de carga. A presença do reforço foi efectiva a partir dum nível de carga próximo dos 260 kN, altura em que na viga 4S-R-B se registou o início de uma quebra de rigidez associada à abertura da fenda diagonal de corte. Desta forma, o CFRP ofereceu resistência efectiva à abertura das fendas de corte que os interceptaram, proporcionando um aumento de rigidez, conforme se pode verificar da análise da Figura 4.46. O aumento de rigidez foi proporcional à percentagem de laminados de CFRP.

Tabela 4.12 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série B - $\rho_{sw} = 0.17\%$).

Viga	F_{max} [kN]	$\Delta F_{max} / F_{max}^{4S-R-B}$ [%]	$u_{F_{max}}$ [mm]
4S-R-B	371.4	-	6.25
4S-4LV-B	424.5	14.3	9.32
4S-4LVa-B	439.2	18.3	7.95
4S-7LV-B	427.4	15.1	9.75
4S-4LI45-B	442.5	19.1	7.93
4S-7LI45-B	478.1	28.7	8.26
4S-4LI60-B	443.8	19.5	6.91
4S-6LI60-B	457.6	23.2	7.31
4S-4M-B	417.3	12.4	7.01
4S-7M(1)-B	423.0	13.9	7.53

Figura 4.46 - Comportamento das vigas ensaiadas da série B com $\rho_{sw} = 0.17\%$: a) percentagem mínima de CFRP; b) percentagem intermédia de CFRP.

Tomando em consideração o valor da força máxima da viga de referência 4S-R-B (F_{max}^{4S-R-B}), as soluções de reforço com a menor percentagem de laminados de CFRP conduziram aos seguintes acréscimos de capacidade máxima de carga: 14.3% (laminados na vertical), 19.1% (laminados a 45°) e 19.5% (laminados a 60°). O aumento da percentagem de CFRP aplicada conduziu a maiores aumentos na carga máxima das vigas (F_{max}). Com efeito, as soluções de reforço de laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° referentes à maior percentagem de CFRP testada garantiram, tomando como base de comparação o valor de F_{max}^{4S-R-B} , um aumento de F_{max} igual a 15.1%, 28.7% e 23.2%, respectivamente. Para a menor percentagem de CFRP, a viga “equivalente” em termos de reforço com mantas coladas externamente (viga 4S-4M-B) obteve um valor de F_{max} 12.4% superior ao da viga de referência 4S-R-B, enquanto que para a maior percentagem de CFRP, o acréscimo de carga máxima proporcionado pelo reforço foi de 13.9%. Comparando as soluções NSM com as EBR é possível constatar que, para a gama de ρ_{sw} em análise, a técnica NSM foi mais eficaz, independentemente da percentagem e orientação dos laminados.

O melhor rendimento da técnica NSM em relação à técnica EBR também foi evidente em termos de capacidade deformacional na rotura. O valor médio de $u_{F_{max}}$ para as vigas com laminados e com mantas de CFRP foi de 8.20 mm e de 7.27 mm, respectivamente. Tomando como base o valor da deformação $u_{F_{max}}$ da viga 4S-R-B (6.25 mm), a aplicação do reforço com laminados garantiu um aumento de capacidade deformacional na rotura de 31.2%, enquanto no caso do reforço com mantas o referido aumento foi de 16.3%, ou seja, cerca de 50% do garantido pela técnica NSM. Das duas gamas de percentagens de reforço de CFRP testadas, os valores mais altos da deformação na rotura foram registados nos modelos que continham a maior das percentagens. As vigas com laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° obtiveram valores médios de $u_{F_{max}}$ de 9.01 mm, 8.1 mm e 7.11 mm, respectivamente.

A solução de laminados verticais referente à menor percentagem de CFRP (4 laminados espaçados de 180 mm por face do vão de corte a) foi aplicada em duas vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$ (vigas 4S-4LV-B e 4S-4LVa-B) e que apenas tinham, como diferença, a posição relativa do CFRP em relação à dos estribos de aço (Figura 4.24). Na viga 4S-4LV-B a solução de reforço foi distribuída de acordo com o critério pré-estabelecido ilustrado na Figura 4.3 enquanto na viga 4S-4LVa-B, cada par de laminados de CFRP, foi colocado a meio da distância entre estribos de aço. Desta forma, na segunda das referidas vigas foi adoptada uma distribuição de reforço mais homogénea que a da viga 4S-4LV-B. A análise dos dados da Tabela 4.12 e da Figura 4.46 permite constatar que a solução de reforço da viga

4S-4LVa-B foi a mais eficaz. Com efeito, a capacidade de carga máxima desta viga foi 3.5% superior à da viga 4S-4LV-B e, praticamente, igual à carga máxima das vigas que continham a menor percentagem de CFRP com laminados inclinados (4S-4LI45-B e 4S-4LI60-B). Além de se ter verificado um maior aumento na capacidade de carga máxima, o acréscimo de rigidez alcançado pela viga 4S-4LVa-B também foi superior ao da viga 4S-4LV-B. Os resultados obtidos nestas duas vigas comprovam as considerações que têm sido efectuadas, ao longo do presente capítulo, relativamente à preferência de soluções de reforço mais homogêneas, em termos da distribuição dos vários elementos resistentes ao esforço transversal, de forma a otimizar o desempenho do CFRP.

4.3.4.2.2 - Modos de rotura

Como era esperado, a rotura por corte acabou por se registar em todas as vigas ensaiadas, tendo ocorrido no menor dos vãos de corte a . Na Figura 4.47 apresentam-se pormenores da zona de rotura das vigas da série B com $\rho_{sw} = 0.17\%$. Nas fotografias da referida figura as linhas verticais correspondem à localização dos estribos de aço e os círculos à posição das secções onde ocorreu a rotura dos estribos durante o ensaio.

A viga 4S-R-B atingiu a sua capacidade máxima de carga quando ocorreu a rotura de um dos estribos que atravessavam a fenda de rotura de corte. A rotura dos restantes estribos ocorreu após a viga ter atingido a sua carga máxima. O modo de rotura observado nas vigas com a menor percentagem de CFRP para as soluções de laminados a 45° e a 60° foi idêntico e ocorreu pela cedência da parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga. Para a viga 4S-4LI45-B, o comprimento do laminado que se destacou foi de 14.0 cm e a cedência do CFRP foi precedida pelo escorregamento da parte inferior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga. Quando ocorreu este escorregamento, o esforço que até então o referido laminado resistia foi absorvido pelos elementos resistentes ao esforço transversal vizinhos (terceiro estribo a contar da secção da carga e laminado que cedeu imediatamente antes da viga atingir a sua carga máxima: 2º laminado a contar da secção da carga). Na viga 4S-4LI60-B o comprimento do laminado entre a fenda de rotura de corte (a que esteve na origem do esgotamento da capacidade máxima da viga) e a sua extremidade superior (a que cedeu) foi de 13 cm. No entanto, a 5 cm da referida extremidade havia outra fenda de corte que diminuiu a eficácia da ancoragem do laminado. A carga máxima da viga 4S-4LV-B foi atingida quando ocorreu a rotura de um dos estribos que atravessava a fenda de rotura de corte. Previamente, ocorreu o escorregamento da parte inferior do terceiro laminado e da parte superior do segundo laminado, ambos a contar da secção de aplicação da carga. Estas cedências do CFRP, antes da carga máxima, contribuíram para a menor rigidez desta viga em relação à da viga

4S-4LVa-B (ver Figura 4.46). A capacidade máxima resistente da viga 4S-4LVa-B foi alcançada imediatamente antes da rotura do segundo estribo a contar da secção de aplicação da carga.

A carga máxima da viga 4S-7LI45-B foi atingida imediatamente antes de ocorrer o destacamento, contendo betão adjacente, da parte inferior do laminado central. Posteriormente, a parte superior do terceiro e quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga cederam. A intersecção das correspondentes linhas de rotura dos mencionados laminados, motivada pela sua proximidade, proporcionou o destacamento de uma parede constituída por betão e laminados de CFRP. A carga máxima da viga 4S-6LI60-B foi atingida imediatamente antes de se dar a cedência do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga. Previamente, cedeu a parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga. Nesta viga, tal como aconteceu na viga 4S-4LI60-B, nenhum dos estribos de aço rompeu. A capacidade máxima de carga da viga 4S-7LV-B foi atingida quando ocorreu a rotura de um dos estribos que atravessava a fenda de rotura de corte (ver Figura 4.47). Previamente, ocorreu o escorregamento da parte inferior do terceiro laminado a contar da secção da carga (lado representado na fotografia da Figura 4.47) e a cedência da parte inferior do laminado instrumentado. A cedência do CFRP, associada a baixos comprimentos de amarração, condicionou o comportamento da viga 4S-7LV-B até à rotura, nomeadamente, no valor atingido para a carga máxima. Estes factos justificam o menor valor da carga máxima registado na viga 4S-7LV-B, relativamente ao da viga 4S-4LVa-B.

O modo de rotura das vigas reforçadas ao corte com mantas coladas externamente foi o destacamento do CFRP. A capacidade de carga máxima da viga 4S-4M-B (417.3 kN) ocorreu imediatamente antes de se dar o destacamento da quarta faixa a contar da secção de aplicação da carga. Previamente, verificou-se a cedência da segunda (aos 383 kN) e da terceira (aos 388 kN) manta a contar da secção da carga. A carga máxima da viga 4S-7M(1)-B foi atingida imediatamente antes de se dar o destacamento da sexta faixa de manta a contar da secção de aplicação da carga. Antes disso, para uma carga de 361 kN e 423 kN ocorreu, respectivamente, o destacamento da quarta e da quinta faixa de manta a contar da secção de aplicação da carga. Em ambas as vigas EBR, a ordem pela qual se destacaram as três faixas de manta anteriormente referidas, e que foram atravessadas pela fenda de rotura de corte, esteve directamente associada aos respectivos comprimentos de colagem (menor comprimento para a primeira faixa que se destacou e maior comprimento para a faixa que se destacou em último lugar). Nas curvas de comportamento das vigas 4S-4M-B e 4S-7M-B é possível verificar os sucessivos destacamentos que foram mencionados (quebras de capacidade de carga das vigas).

A análise da Figura 4.47 permite observar o padrão de fendilhação final instalado no vão de corte *a* das vigas em análise. A presença do reforço de CFRP motivou o aparecimento de mais fendas de

corte e esse aumento foi maior no caso das vigas reforçadas com laminados inclinados. Para a maior percentagem de CFRP, a solução da viga 4S-7LI45-B foi a que originou um maior número de fendas e, comparativamente à viga 4S-6LI60-B, o padrão de fendilhação foi mais difuso.

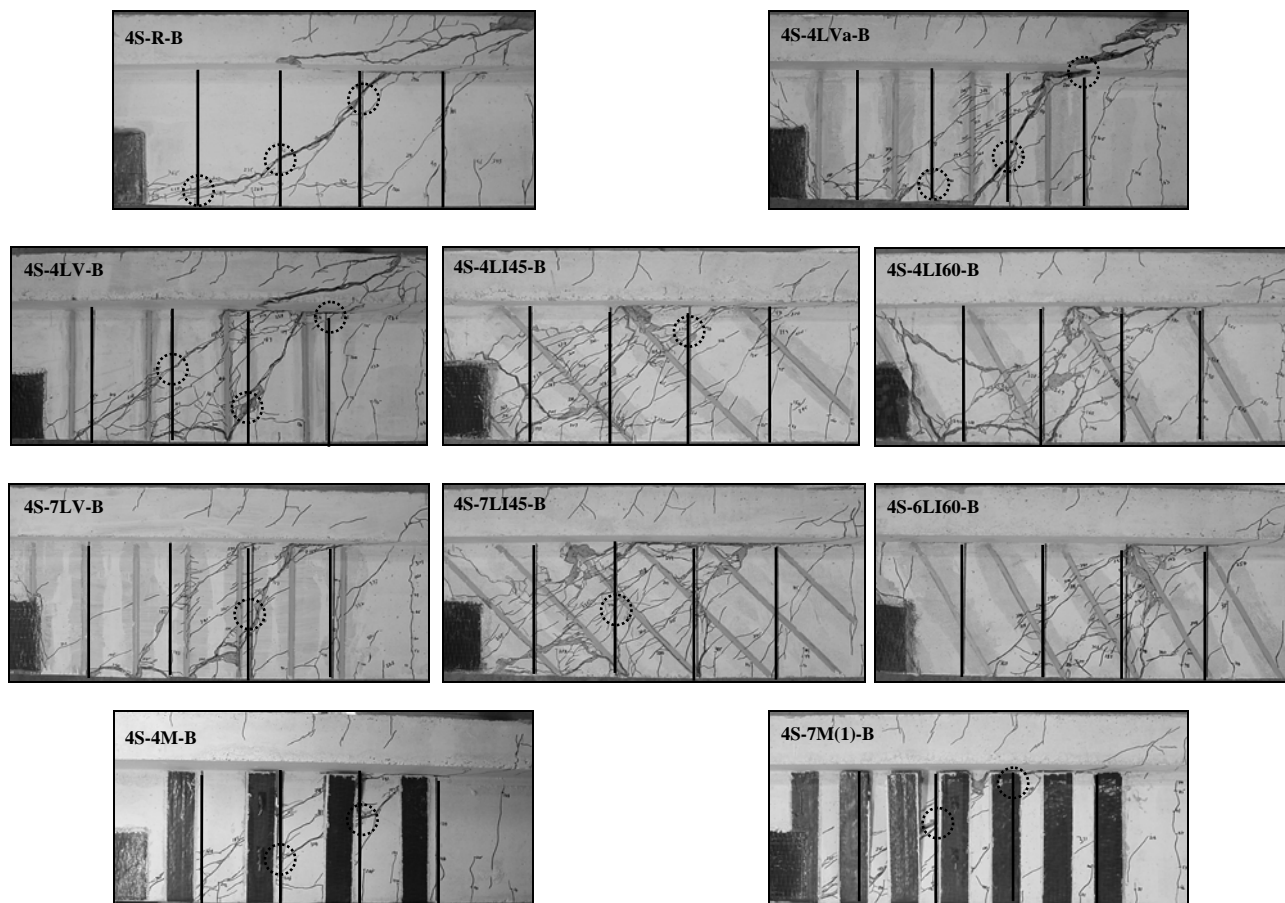


Figura 4.47 - Modos de rotura das vigas da série B com $\rho_{sw} = 0.17\%$.

4.3.4.2.3 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais

Na Tabela 4.13 apresentam-se, para cada viga reforçada contendo $\rho_{sw} = 0.17\%$, os valores das extensões nos CFRP instrumentados (laminados ou mantas) correspondentes à carga máxima. Para o caso em que a extensão máxima nos CFRP ocorreu para uma carga inferior à carga máxima, os valores registados nos extensómetros nesse instante encontram-se entre parêntesis (ver Figuras 4.7, 4.27 e 4.28). Na mesma tabela apresenta-se, para cada viga ensaiada, o valor da extensão máxima registada no CFRP instrumentado até ao instante em que as vigas atingiram a sua capacidade máxima resistente (ε_{CFRP}^{max}).

Os valores da extensão máxima variaram entre os 6.6% e os 9.4% para o caso das vigas reforçadas com a técnica da inserção e entre os 5.8% e os 10.1% para o caso das vigas reforçadas com a técnica da colagem externa. Destes valores destaca-se o valor obtido na viga 4S-4M-B (reforço com manta) e

que é justificável pelo facto da manta ter sido atravessada por uma fenda de corte na secção onde foi colado o Ext.2.

Tabela 4.13 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP (série B - $\rho_{sw} = 0.17\%$).

Viga	CFRP*	$\varepsilon_{Ext.1}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.2}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.3}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.4}$ [‰]	ε_{CFRP}^{max} [‰]
4S-4LV-B	B**	0.31 (0.15)	1.90 (1.67)	4.71 (6.62)	2.85 (-)	6.6
4S-4LVa-B	B**	0.43 (0.33)	6.17 (5.87)	4.63 (4.70)	5.82 (6.72)	6.7
4S-7LV-B	B***	6.83	8.71	9.14	5.11	9.1
4S-4LI45-B	B	2.01	7.94	6.71	5.84	7.9
4S-7LI45-B	B	7.41	8.20	6.98	4.19	8.2
4S-4LI60-B	B	0.94	9.35	8.58	4.40	9.4
4S-6LI60-B	B	1.07	6.10	8.66	3.22	8.7
4S-4M-B****	B**	0.06 (6.55)	1.43 (10.11)	(-) 3.75	0.31 (3.64)	10.1
4S-7M(1)-B	B	(-) 5.76	(-) 2.52	1.66 (0.48)	3.20 (2.54)	5.8

* A letra B quer dizer que o posicionamento do laminado instrumentado é igual ao CFRP B das vigas com CFRP da série B que continham uma percentagem de armadura transversal igual a 0.10% (ver Tabela 4.10). ** Os valores das extensões entre parênteses referem-se à carga para a qual ocorreu a máxima extensão no CFRP instrumentado antes da carga máxima (367.9 kN na viga 4S-4LV-B, 420.0 kN na viga 4S-4LVa-B, 379.5 kN na viga 4S-4M-B, 361.4 kN na viga 4S-7M(1)-B). *** Os valores das extensões referem-se a uma carga (415.2 kN) prévia à que originou a cedência do laminado. **** A designação (-) refere-se ao facto da extensão registada no extensómetro para a carga em questão apresentar um valor negativo, o que significa que a manta está desactivada.

4.3.4.3 - Avaliação do efeito da percentagem de armadura transversal ρ_{sw}

Um dos objectivos da presente série de vigas foi avaliar o efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo. No caso da técnica da colagem externa de CFRP, e de acordo com o que já foi mencionado no Capítulo 2, existe uma interacção entre a armadura transversal e o reforço ao corte de CFRP. Uma das causas da existência desta interacção está associada ao facto do padrão de fendilhação que se instala nas vigas de betão armado ser função da percentagem de estribos de aço. O que se tem comprovado com os ensaios experimentais realizados é que o padrão de fendilhação é mais difuso e repartido à medida que a percentagem de estribos de aço aumenta (ver por exemplo na Figura 4.31 o padrão de fendilhação da viga 2S-R-B e o da viga 7S-R-B). Este facto tem consequência directa ao nível do grau de fixação dos reforços de CFRP, pois a um aumento do número de fendas que atravessam o CFRP está associada uma diminuição da referida fixação. Desta forma, justifica-se que o aumento da percentagem de estribos de aço pode tornar a mesma solução de reforço ao corte de CFRP menos eficaz.

No que diz respeito à técnica de reforço ao corte com laminados inseridos (NSM), além da questão do padrão de fendilhação que se referiu anteriormente, existem dois outros fenómenos que devem ser tidos em consideração na análise do efeito da percentagem de estribos de aço no desempenho do

CFRP. O primeiro relaciona-se com o facto de o reforço estar inserido no betão de recobrimento, o que pode originar, em algumas situações, uma proximidade grande com a armadura transversal. Esta proximidade pode condicionar o rendimento do CFRP, na medida em que o mecanismo resistente do estribo de aço pode promover o destacamento do CFRP. O segundo fenómeno associado à técnica NSM refere-se à dependência que existe dos modos de rotura das vigas com a percentagem de reforço de CFRP.

Na Tabela 4.14 apresentam-se os valores do acréscimo de carga máxima proporcionados pelas seis soluções de reforço com laminados de CFRP que foram aplicadas, quer a vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ como em vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$. Na Figura 4.48 apresenta-se os referidos acréscimos em função da percentagem de reforço de CFRP (para a percentagem de $\rho_{sw} = 0.10\%$ estão representados os resultados que foram obtidos para as três gamas de percentagens de reforço testadas). O padrão de fendilhação nas vigas em análise para um nível de carga prévio à cedência dos reforços de CFRP encontra-se registado na Figura 4.49.

Tabela 4.14 - Efeito da percentagem ρ_{sw} das vigas da série B (análise comparativa).

Percentagem de reforço de CFRP	Vigas ($\rho_{sw} = 0.10\%$)	$E1 = \Delta F_{max} / F_{max}^{2S-R-B}$ [%]	Vigas ($\rho_{sw} = 0.17\%$)	$E2 = \Delta F_{max} / F_{max}^{4S-R-B}$ [%]	E2/E1
0.08	2S-4LV-B	11.1	4S-4LV-B	14.3	1.29
0.08	2S-4LI45-B	29.3	4S-4LI45-B	19.1	0.65
0.07	2S-4LI60-B	27.2	4S-4LI60-B	19.5	0.72
0.13	2S-7LV-B	23.1	4S-7LV-B	15.1	0.65
0.13	2S-7LI45-B	38.8	4S-7LI45-B	28.7	0.74
0.11	2S-6LI60-B	29.8	4S-6LI60-B	23.2	0.78

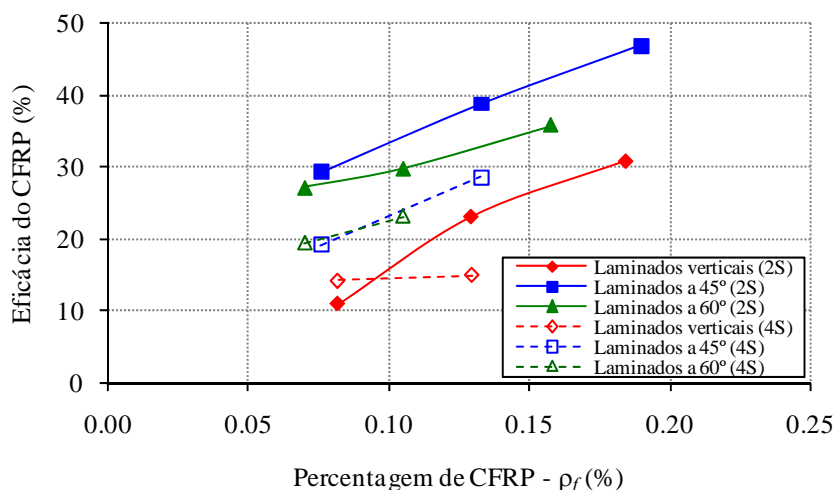


Figura 4.48 - Efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica NSM com laminados ($\rho_{sw} = 0.10\%$: linhas a traço cheio; $\rho_{sw} = 0.17\%$: linhas a tracejado).

Face aos valores da Tabela 4.14 e da Figura 4.48 pode-se concluir que a percentagem de estribos de aço tem um papel significativo no grau de eficácia na técnica de reforço ao corte em análise nesta dissertação, ou seja, existe uma interacção entre a armadura transversal e o reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos. Com efeito, com a excepção da menor percentagem de laminados na vertical, verificou-se uma diminuição do grau de eficácia das várias soluções de reforço de CFRP testadas com o aumento da percentagem de estribos de aço. A excepção referida está directamente relacionada com o baixo nível de rendimento do reforço de CFRP da viga 2S-4LV-B e que anteriormente já foi justificado. Em média, o ganho de resistência proporcionado pelas soluções de reforço aplicadas nas vigas com quatro estribos de aço no menor vão de corte ($\rho_{sw} = 0.17\%$) foi 70% do ganho de resistência proporcionado pelas mesmas soluções de reforço quando aplicadas a vigas com dois estribos de aço no menor vão de corte ($\rho_{sw} = 0.10\%$).

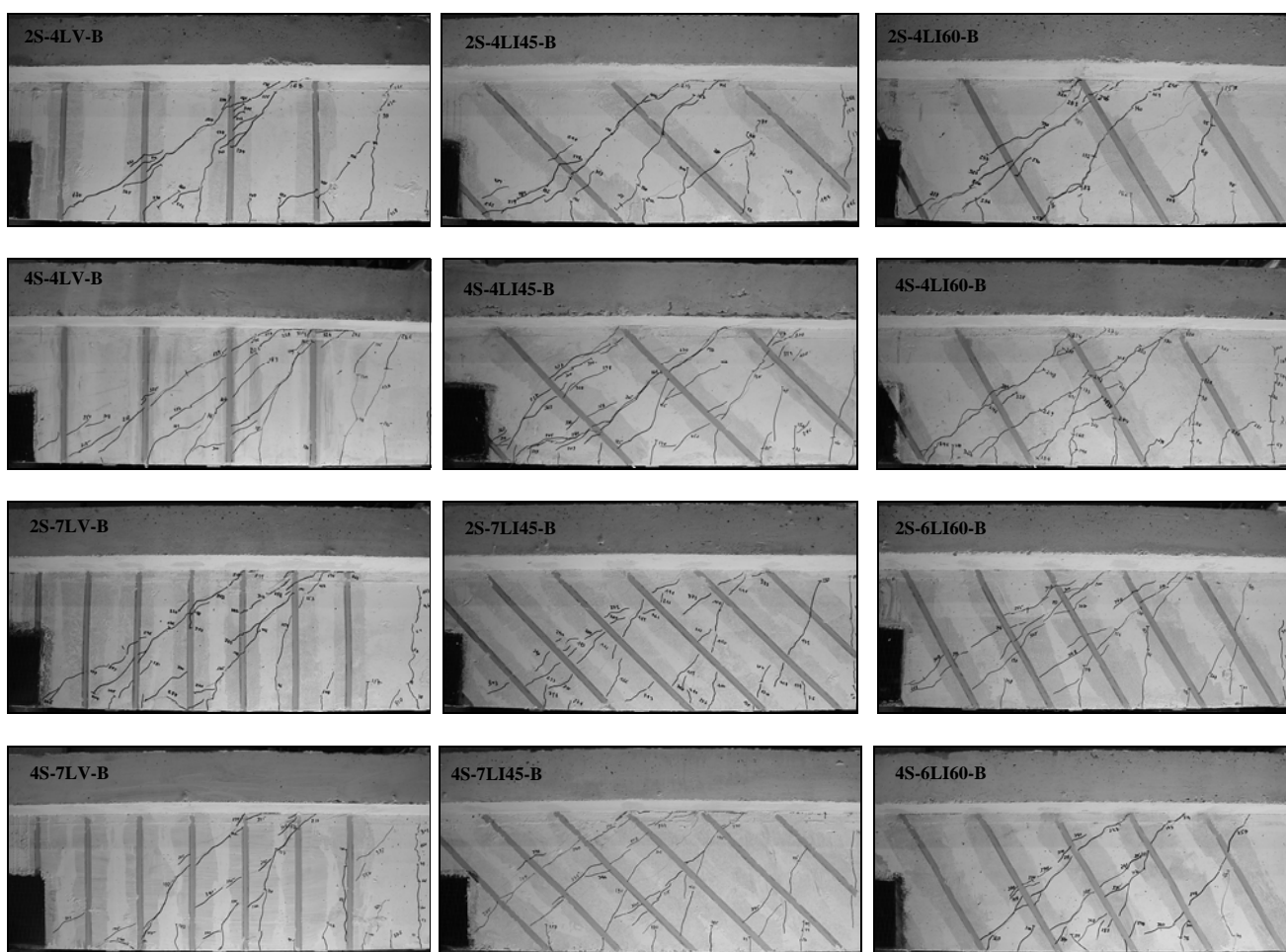


Figura 4.49 - Efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica NSM com laminados (padrão de fendilhação).

A análise dos valores da Tabela 4.14 também permite verificar que a menor percentagem de reforço de CFRP foi mais sensível à variação da percentagem de estribos de aço. Por exemplo, a relação entre o acréscimo de carga máxima obtido na viga 4S-4LI45-B e aquele que se constatou na viga 2S-

4LI45-B foi de 65%, enquanto que o valor da referida relação para as vigas 4S-7LI45-B e 2S-7LI45-B foi de 74%. Algo de semelhante se passou para as soluções de laminados a 60°: a relação entre o acréscimo de carga máxima obtido na viga 4S-4LI60-B e aquele que se constatou na viga 2S-4LI60-B foi de 72%, enquanto que o valor da referida relação para as vigas 4S-6LI60-B e 2S-6LI60-B foi de 78%. A justificação destes factos passa pela análise do padrão de fendilhação instalado nas vigas (Figura 4.49). Com efeito, as maiores diferenças entre o padrão de fendilhação das vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ e as vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$ registaram-se para as soluções com laminados inclinados com a menor percentagem de CFRP. As duas fendas diagonais que atravessaram o terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga (vigas 4S-4LI45-B e 4S-4LI60-B) provocaram a sua cedência na parte inferior, o que “acelerou” o destacamento da parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga. A carga máxima das vigas 2S-4LI45-B e 2S-4LI60-B registou-se com a cedência da parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga sem a cedência prévia do laminado vizinho (3º laminado a contar da secção de aplicação da carga).

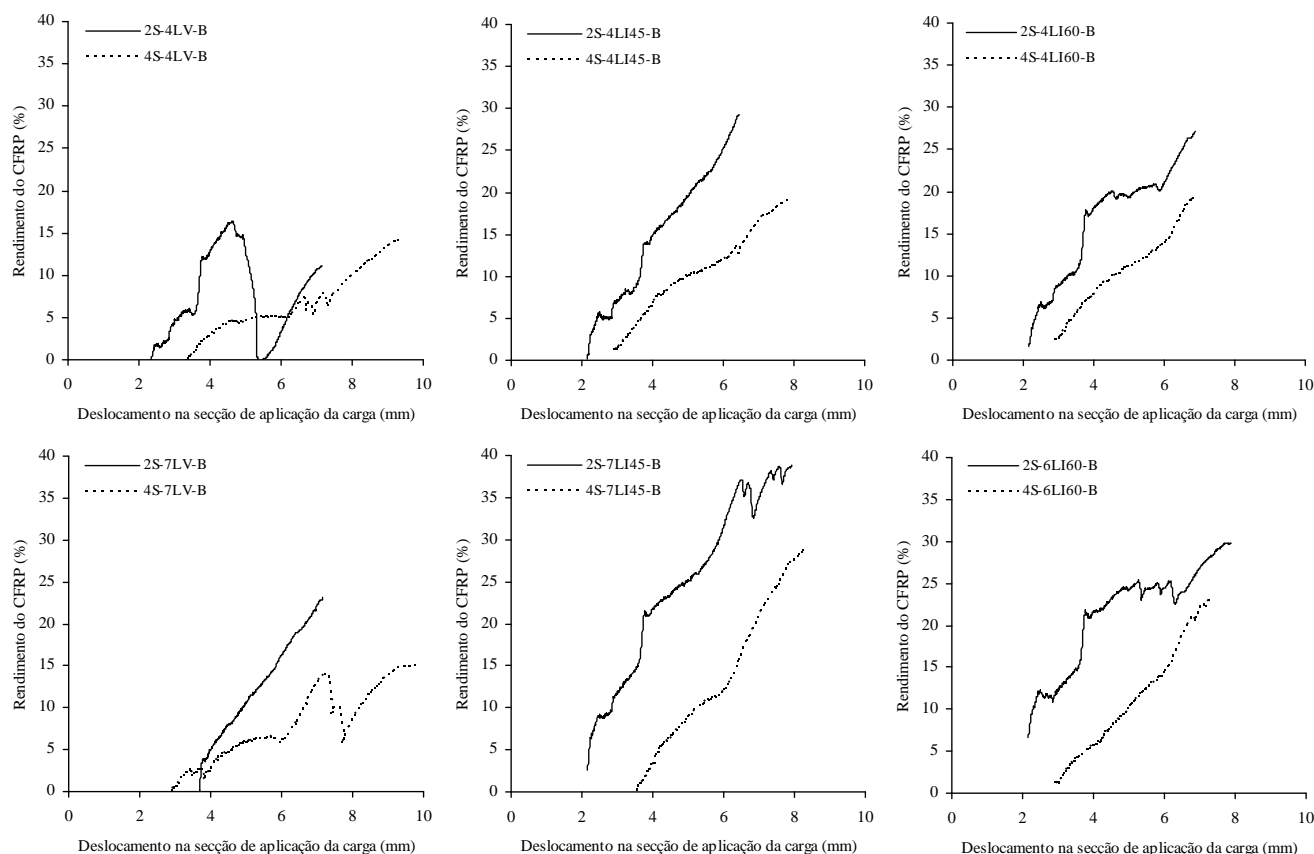


Figura 4.50 - Efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia do reforço em termos de acréscimo de rigidez.

Na Figura 4.50 apresenta-se o acréscimo de rigidez proporcionado por cada solução de reforço de CFRP testada quando aplicada a vigas com ρ_{sw} igual a 0.10% como em vigas com ρ_{sw} igual a

0.17%. A análise desta figura permite constatar a existência de uma diminuição da efectividade do reforço em termos de rigidez com o aumento da percentagem de estribos de aço.

Se em termos de acréscimo de rigidez e de capacidade de carga máxima, o aumento da percentagem de estribos de aço proporcionou uma diminuição dos ganhos das referidas grandezas, tal não se verificou em termos de deformação associada à carga máxima que as vigas obtiveram ($u_{F_{max}}$). As soluções de laminados de CFRP aplicadas a vigas com ρ_{sw} igual a 0.10% tiveram em média um valor de $u_{F_{max}}$ 23% superior ao registado na viga 2S-R-B. As mesmas soluções de reforço aplicadas em vigas com ρ_{sw} igual a 0.17% tiveram em média um valor de $u_{F_{max}}$ 32% superior ao registado na viga 4S-R-B.

4.3.4.4 - Considerações sobre os resultados obtidos na série B

A realização dos ensaios das vigas da série B e os resultados que foram obtidos permitiu, desde logo, avançar com algumas considerações, que serão tidas em conta no Capítulo 5 referente à análise geral dos resultados do programa experimental descrito ao longo deste capítulo, e que se passam a expor:

- O uso da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da percentagem de armadura transversal (estribos de aço) e da orientação e percentagem do CFRP, permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga de vigas de betão armado de secção em T com rotura por corte. As soluções de reforço de CFRP testadas, correspondentes a percentagens de CFRP que variaram entre os 0.07% e os 0.19%, proporcionaram um aumento da capacidade máxima de carga que variou entre os 11% e os 47%.
- Independentemente da percentagem de estribos de aço e da percentagem de reforço de CFRP, a técnica da inserção de laminados foi mais eficaz que a técnica da colagem externa de faixas de manta em forma de U.
- Os ganhos de resistência proporcionados pelos sistemas de reforço em CFRP adoptados foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, maiores valores de ρ_f garantiram maiores aumentos da capacidade resistente. Em termos de orientação dos CFRP a solução com laminados a 45° foi de um modo geral mais eficaz que a solução de laminados inclinados a 60°. A solução de laminados a 60° foi mais eficaz que a solução com laminados verticais.
- Os modelos reforçados com a maior percentagem de CFRP apresentaram um valor médio da carga máxima igual a 90% da verificada no modelo de viga “equivalente” em termos de betão armado (viga 7S-R-B). O modelo de viga “equivalente” com o reforço aplicado usando a técnica da

colagem externa (viga 2S-7M(2)-B) teve uma carga máxima igual a 79% da alcançada pela viga 7S-R-B. A capacidade de carga alcançada pelas vigas com a máxima percentagem de laminados de CFRP, a partir do momento em que os reforços foram activados (formação de fendas corte), foi maior do que a registada na viga 7S-R-B e na viga 2S-7M(2)-B. Esta constatação evidencia as potencialidades das soluções de reforço com laminados de CFRP inseridos em termos de rigidez, ou seja, em termos de comportamento em serviço da estrutura reforçada.

- A percentagem de armadura transversal influencia a eficácia da técnica de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos. As soluções de reforço aplicadas a vigas com uma percentagem de estribos de aço de 0.17% conduziram a acréscimos de carga máxima das vigas de valor igual a 70% do obtido pelas mesmas soluções de reforço mas aplicadas a vigas com uma percentagem de estribos de aço de 0.10%. A diminuição da eficácia do CFRP com o aumento da percentagem de estribos de aço também ocorreu em termos de rigidez.
- Ao contrário do que aconteceu nas vigas da série A, onde a carga máxima das vigas reforçadas ocorreu para flechas de valores próximos da atingida pela viga sem reforço, sendo em alguns casos mesmo inferior, na série B, independentemente da percentagem de armadura transversal, a carga máxima das vigas com laminados de CFRP foi atingida para uma flecha superior à da viga não reforçada. Além desta diferença existente entre o comportamento global das vigas da série A e da série B, registe-se o facto de na segunda série de vigas o valor do acréscimo de carga máxima proporcionado pelas soluções de reforço ser, à excepção de uma viga, igual ao valor do parâmetro $\left(\Delta F / F^{ref}\right)_{max}$. Assim, verificou-se um retardamento da rotura das vigas da série B quando comparado com o que se verificou nas vigas da série A. Uma justificação para esta ocorrência pode residir no facto das vigas da série B terem sido fabricadas com um betão de melhor qualidade. Em termos de resistência à compressão (f_{cm}), à data do ensaio das vigas, a série A tinha um betão com f_{cm} de 31.1 MPa e a série B tinha um betão com f_{cm} de 39.7 MPa. Sendo os modos de rotura condicionados pelo betão, quanto mais resistente este for maior é o desempenho da solução de reforço de CFRP.
- A solução de laminados verticais com a menor percentagem de CFRP foi aplicada a duas vigas (mesmo número e espaçamento dos laminados) e que se diferenciavam pelo posicionamento do CFRP relativamente à distribuição dos estribos de aço. A distância entre os elementos resistentes ao esforço transversal (laminados e estribos de aço) teve uma influência na eficácia do reforço. O cenário de reforço mais eficaz foi o correspondente à distribuição mais homogénea dos referidos elementos.

4.4 - SÉRIE C

4.4.1 - Concepção dos modelos

A realização dos ensaios das vigas da série A e da série B vieram confirmar que a qualidade do betão parece ser um parâmetro de importância relevante na eficácia da técnica de reforço em estudo. Se na definição de todo o programa experimental, que está a ser apresentado neste capítulo, se considerou que um dos parâmetros a avaliar seria a classe de resistência do betão, os resultados obtidos com a realização dos ensaios das vigas das séries A e B comprovaram a pertinência da realização dessa avaliação. Desta forma, na série de vigas C foram adoptadas algumas das soluções de reforço ao corte com laminados de CFRP já testadas em vigas da série B em que a única diferença introduzida foi o tipo de betão. Um outro objectivo que esteve na base da realização da presente série de vigas foi testar a possibilidade da aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de estruturas de betão de fraca resistência. Tendo em conta o propósito agora mencionado, o betão das vigas da série C tinha, à data da realização dos ensaios, um valor de f_{cm} igual a 18.6 MPa.

Na presente série foram testadas treze vigas de betão armado de acordo com o representado na Figura 4.51, onde é possível observar que, em termos de geometria, a única diferença, relativamente às vigas da série B, esteve associada aos mecanismos usados para evitar o destacamento do betão de recobrimento no apoio mais solicitado e para amarrar parte das armaduras longitudinais da face traccionada. Para o primeiro dos referidos objectivos, em vez de se aplicar a solução de reforço com mantas de CFRP (séries A e B) foi adoptada a solução representada na Figura 4.51. Para tal, foi aumentada, em 10 cm, a distância de cada apoio ao respectivo extremo da viga. As vigas da série C tinham um comprimento total de 2.65 m e um vão entre apoios igual ao das vigas das séries A e B, ou seja, 2.25 m. Em relação à amarração das armaduras longitudinais colocadas na face traccionada (as mesmas da série B), os dois varões de 32 mm de diâmetro foram prolongados até aos extremos da viga e soldados a chapas metálicas de acordo com o representado na Figura 4.51. O varão de 16 mm foi dobrado e prolongado ao longo da altura da viga. As vigas da série C continham a mesma armadura transversal no vão de corte b e a mesma relação a/d que as vigas das séries A e B.

A diferença entre os treze modelos de vigas da série C ficou unicamente restrita ao vão de corte a , concretamente, na forma como aí foi garantida a resistência ao esforço transversal. O grupo de modelos ensaiados nesta série englobou: uma viga sem qualquer reforço ao corte (C-R-C); uma viga com estribos $\phi 6@300\text{mm}$ (viga 2S-R-C com ρ_{sw} de 0.10%); cinco vigas contendo estribos $\phi 6@300\text{mm}$ e reforçadas ao corte com distintas soluções de CFRP; uma viga com estribos

$\phi 6@180\text{mm}$ (viga 4S-R-C com ρ_{sw} de 0.17%); e cinco vigas contendo estribos $\phi 6@180\text{mm}$ e reforçadas ao corte com distintas soluções de CFRP.

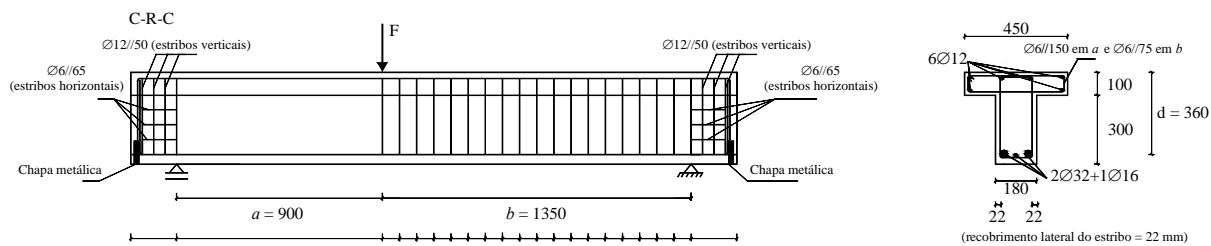


Figura 4.51 - Geometria das vigas da série C (dimensões em mm).

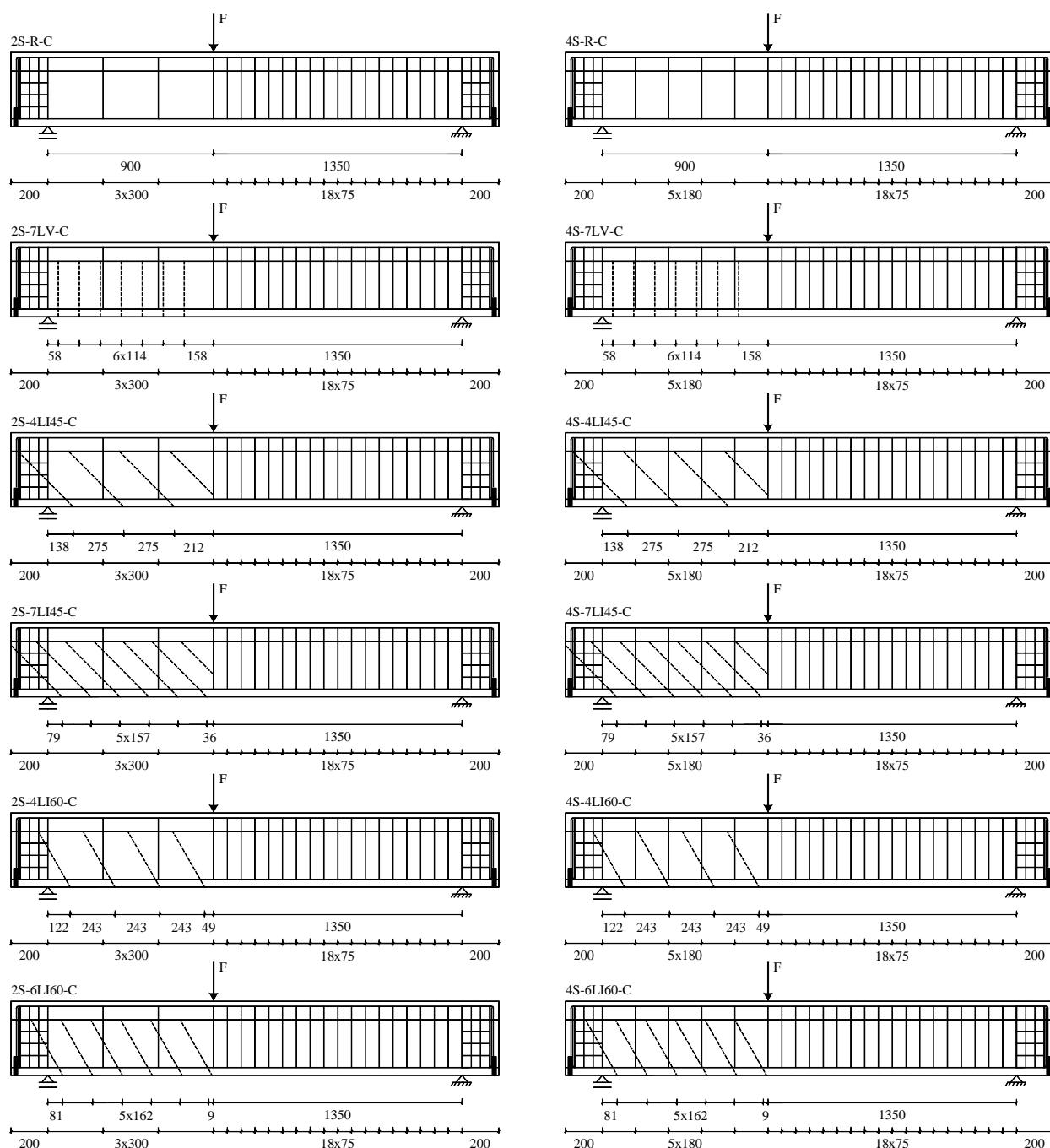


Figura 4.52 - Vigas ensaiadas da série C: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado).

Tabela 4.15 - Informações gerais sobre os modelos de vigas da série C.

Viga	Sistema de reforço ao corte no vão de corte a				
	Material	Quantidade	Percentagem [%] [*]	Espaçamento [mm]	Ângulo [°]
C-R-C	-	-	-	-	-
2S-R-C	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
2S-7LV-C	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x7 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	114	90
2S-4LI45-C	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	275	45
2S-7LI45-C	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x7 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	157	45
2S-4LI60-C	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.07	243	60
2S-6LI60-C	Estribos de aço	2 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x6 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.11	162	60
4S-R-C	Estribos de aço	4 ϕ 6 de dois ramos	0.17	180	90
4S-7LV-C	Estribos de aço	4 ϕ 6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x7 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	114	90
4S-4LI45-C	Estribos de aço	4 ϕ 6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	275	45
4S-7LI45-C	Estribos de aço	4 ϕ 6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x7 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	157	45
4S-4LI60-C	Estribos de aço	4 ϕ 6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x4 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.07	243	60
4S-6LI60-C	Estribos de aço	4 ϕ 6 de dois ramos	0.17	180	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x6 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.11	162	60

^{*} A percentagem de estribos de aço foi obtida por (2.5) e a percentagem de reforço de CFRP foi obtida por (3.1).

As cinco soluções de reforço de CFRP adoptadas para os modelos com uma percentagem de armadura transversal (ρ_{sw}) igual a 0.10% foram igualmente aplicadas a vigas com ρ_{sw} igual a 0.17%. Desta forma, para a gama de betão analisada na presente série de vigas foi também possível avaliar o efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo. Tal como representado na Figura 4.51, e à semelhança do ocorrido nas vigas das séries A e B, o betão de recobrimento lateral dos estribos era de 22 mm. Os laminados utilizados nesta série de vigas tinham uma secção transversal de 1.4x9.5 mm² (a mesma dos laminados aplicados na série B).

As soluções de reforço de CFRP testadas na série C, descritas na Tabela 4.15 e ilustradas na Figura 4.52, correspondem às que foram adoptadas nos seguintes pares de vigas da série B (ver Tabela 4.7 e Figura 4.24): i) 2S-7LV-B e 4S-7LV-B; ii) 2S-4LI45-B e 4S-4LI45-B; iii) 2S-4LI60-B e 4S-4LI60-B; iv) 2S-7LI45-B e 4S-7LI45-B; v) 2S-6LI60-B e 4S-6LI60-B. Assim, na presente série de vigas foram analisadas três orientações para o reforço (verticais, inclinados a 45° e a 60°) e, para o caso das soluções com laminados inclinados a 45° e a 60°, foram testadas duas percentagens de CFRP.

4.4.2 - Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão das vigas, cuja composição se encontra registada no anexo B desta dissertação, foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas, a qual correspondeu uma idade média de 51 dias. Para tal, de acordo com a EN 206-1 (2000) efectuaram-se ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 3.5). Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm, 12 mm, 16 mm e de 32 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial (Figura 3.5) efectuados seguindo o estipulado na EN 10002-1 (1990). A caracterização dos laminados de CFRP utilizados (S&P Laminates CFK 150/2000, S&P (2002)) foi efectuada por intermédio da realização de ensaios de tracção uniaxial (Figura 4.25), segundo a ISO 527-5 (1997), em sete provetes com as dimensões representadas na Figura 3.6 (a única diferença foi a largura do laminado que nesta série de vigas era de 9.5 mm). Na Tabela 4.16 estão registados os valores médios das propriedades mecânicas mais significativas do betão, do aço e dos laminados de CFRP obtidos experimentalmente. Os valores determinados em cada provete nos ensaios de caracterização dos referidos materiais estão compilados no anexo B. O adesivo utilizado para fixação dos laminados ao betão foi igual ao usado nas vigas das séries A e B.

Tabela 4.16 - Principais propriedades do betão, do aço e dos laminados de CFRP referentes à série C.

Betão	Resistência à compressão				
	$f_{cm} = 15.9$ MPa (aos 28 dias)	$f_{cm} = 18.6$ MPa (aos 51 dias - idade à data do ensaio das vigas)			
Aço	Resistência à tracção	$\phi 6$	$\phi 12$	$\phi 16$	$\phi 32$
	f_{sym} (Tensão de cedência)	539 MPa	453 MPa	429 MPa	734 MPa
	f_{sum} (Tensão última)	595 MPa	581 MPa	563 MPa	885 MPa
	Resistência à tracção	Módulo de Elasticidade		Extensão máxima*	
Laminado de CFRP	$f_{fum} = 2847.9$ MPa (Tensão última)	$E_{fm} = 174.3$ GPa		$\varepsilon_{fum} = 16.3$ ‰	

* Valor obtido pela lei de Hooke.

Figura 4.53 - Localização dos estribos e laminados instrumentados nas vigas da série C.

Em termos de instrumentação dos laminados e dos estribos de aço, o critério adoptado foi o mesmo que foi usado para as vigas da série B com ρ_{sw} igual a 0.10%. Os dois laminados instrumentados por viga tinham quatro extensómetros colados de acordo com a distribuição representada na Figura 4.7. O estribo de aço instrumentado continha três extensómetros colados de acordo com a configuração apresentada na Figura 4.8. A localização dos laminados e estribos instrumentados nas vigas da série C está representada na Figura 4.53. A face da alma da viga onde foram instalados os laminados, assim como, o ramo do estribo contendo dois extensómetros foi a oposta à representada na Figura 4.53. Nas vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ o estribo instrumentado foi, à semelhança do que aconteceu nas vigas das séries A e B, o que estava localizado mais próximo do apoio e nas vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$ o estribo instrumentado foi, à semelhança do que aconteceu nas vigas da série B, o terceiro a contar da secção de aplicação da carga.

4.4.4 - Apresentação dos resultados

4.4.4.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura

Na Tabela 4.17 apresenta-se o valor da força máxima obtida em cada uma das vigas ensaiadas da série C (F_{max}). Atribuindo a designação F_{max}^{ref} à carga máxima registada nas vigas de referência de betão armado 2S-R-C (viga de referência das vigas 2S-7LV-C, 2S-4LI45-C, 2S-7LI45-C, 2S-4LI60-C e 2S-6LI60-C) e 4S-R-C (viga de referência das vigas 4S-7LV-C, 4S-4LI45-C, 4S-7LI45-C, 4S-4LI60-C e 4S-6LI60-C), determinaram-se os factores $\Delta F_{max}/F_{max}^{ref}$ indicados na Tabela 4.17 ($\Delta F_{max} = F_{max} - F_{max}^{ref}$). Nesta tabela também se apresenta o valor do parâmetro $(\Delta F/F^{ref})_{max}$, que corresponde ao valor máximo da relação entre o incremento de carga proporcionado pelo reforço de CFRP (ΔF), após a formação da fenda diagonal de corte na viga de referência, e o valor da correspondente força na referida viga de referência (F^{ref}). As flechas na secção de aplicação da carga correspondentes ao parâmetro $(\Delta F/F^{ref})_{max}$, designada por $u_{(\Delta F/F^{ref})_{max}}$, e à carga máxima ($u_{F_{max}}$) também estão registadas na Tabela 4.17. As respostas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga e a relação $(\Delta F/F^{ref})_{max}$ vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com CFRP estão apresentadas nas Figuras 4.54 e 4.55. O primeiro tipo de resposta traduz o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente.

Tabela 4.17 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série C).

Viga	ρ_{sw} [%]	ρ_f [%]	$\left(\Delta F / F^{ref}\right)_{max}$ [%]	$u_{\left(\Delta F / F^{ref}\right)_{max}}$ [mm]	F_{max} [kN]	$\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ [%]	$u_{F_{max}}$ [mm]
C-R-C	-	-	-	-	147.0	-	3.44
2S-R-C	0.10	-	0.0	-	226.5	-	5.29
2S-7LV-C	0.10	0.13	26.1	4.48	273.7	20.8	4.55
2S-4LI45-C	0.10	0.08	24.9	5.79	283.0	24.9	5.79
2S-7LI45-C	0.10	0.13	38.5	4.50	306.5	35.3	4.79
2S-4LI60-C	0.10	0.07	27.4	4.45	281.6	24.3	5.57
2S-6LI60-C	0.10	0.11	31.4	5.84	297.7	31.4	5.84
4S-R-C	0.17	-	0.0	-	303.8	-	7.20
4S-7LV-C	0.17	0.13	6.7	5.88	315.2	3.8	5.98
4S-4LI45-C	0.17	0.08	14.3	9.28	347.2	14.3	9.28
4S-7LI45-C	0.17	0.13	19.3	6.38	356.4	17.3	7.83
4S-4LI60-C	0.17	0.07	19.6	6.38	345.6	13.8	7.67
4S-6LI60-C	0.17	0.11	20.9	6.38	362.3	19.3	8.36

Uma análise geral aos dados da Tabela 4.17 e às Figuras 4.54 e 4.55 permite constatar que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado com um betão de fraca resistência, independentemente da percentagem de estribos de aço e da orientação e percentagem do CFRP, proporcionou aumentos de rigidez e de capacidade máxima de carga. Algumas das soluções de reforço testadas proporcionaram ainda acréscimos de deformação na rotura.

A presença do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal tornou-se evidente a partir do momento associado à formação da fenda diagonal de corte na viga de referência. Na curva de comportamento carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga, esta ocorrência é evidente na momentânea interrupção do aumento da capacidade de carga das vigas de referência: no caso da viga 2S-R-C, para uma carga de cerca de 126 kN e uma flecha na secção de aplicação da carga de 1.29 mm; no caso da viga 4S-R-C para uma carga de cerca de 131 kN e uma flecha na secção de aplicação da carga de 1.26 mm. Desta forma, pode-se constatar que o CFRP ofereceu resistência efectiva à abertura das fendas de corte que os interceptaram, proporcionando um aumento de rigidez, conforme se pode verificar da análise das Figuras 4.54 e 4.55. O aumento de rigidez foi proporcional à percentagem de CFRP.

Tomando em consideração o valor da força máxima das vigas de referência (2S-R-C e 4S-R-C), as configurações de reforço referentes à menor percentagem de CFRP aplicada conduziram aos

seguintes ganhos de capacidade máxima de carga: 24.9% (laminados a 45°) e 24.3% (laminados a 60°) para as vigas com dois estribos de aço no menor vão de corte; 14.3% (laminados a 45°) e 13.8% (laminados a 60°) para as vigas com quatro estribos de aço no menor vão de corte. Em relação ao parâmetro $(\Delta F/F^{ref})_{max}$ apenas a contribuição das soluções de reforço das vigas com laminados a 60° foi maior do que em termos de contributo para o aumento da capacidade máxima de carga (27.4% no caso da viga 2S-4LI60-C e 19.6% no caso da viga 4S-4LI60-C). Os valores apresentados permitem verificar que em termos de carga máxima as duas orientações de CFRP testadas conduziram a resultados muito próximos. As vigas reforçadas com laminados inclinados a 60° tiveram melhor desempenho no que diz respeito ao acréscimo de rigidez.

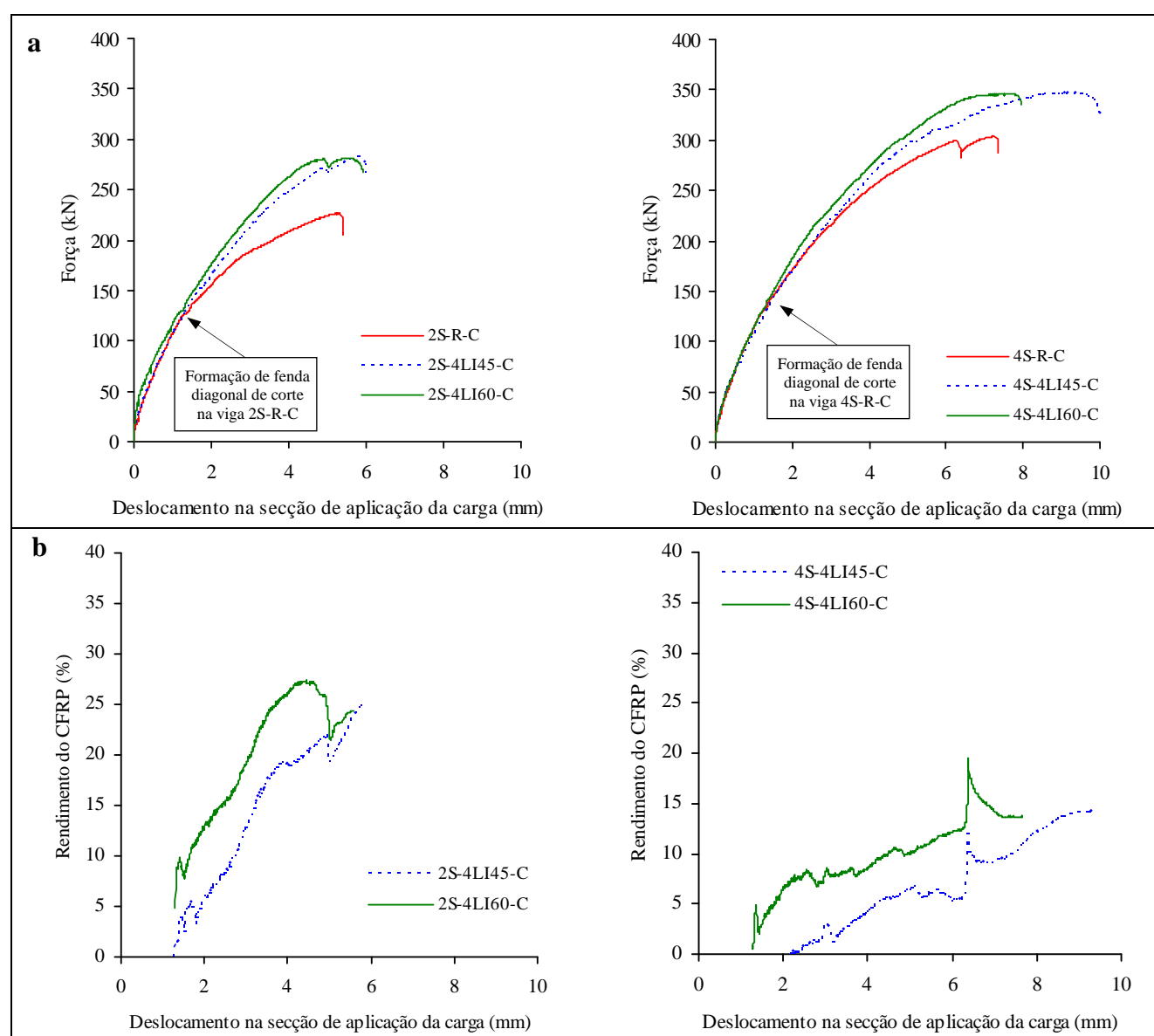


Figura 4.54 - Comportamento das vigas ensaiadas da série C com a menor percentagem de CFRP: a) capacidade de carga; b) rendimento do CFRP.

Tomando em consideração o valor da força máxima das vigas de referência (2S-R-C e 4S-R-C), as configurações de reforço referentes à maior percentagem de CFRP aplicada conduziram aos seguintes

ganhos de capacidade máxima de carga: 20.8% (laminados verticais), 35.3% (laminados a 45°) e 31.4% (laminados a 60°) para as vigas com dois estribos de aço no menor vão de corte; 3.8% (laminados verticais), 17.3% (laminados a 45°) e 19.3% (laminados a 60°) para as vigas com quatro estribos de aço no menor vão de corte. Para esta gama de percentagem de reforço, os valores de $(\Delta F/F^{ref})_{max}$ obtidos nas vigas 2S-7LV-C (26.1%), 2S-7LI45-C (38.5%), 4S-7LV-C (6.7%), 4S-7LI45-C (19.3%) e 4S-6LI60-C (20.9%) foram ligeiramente superiores aos respectivos valores do aumento que proporcionaram em termos de carga máxima. O reforço com laminados a 45° foi mais eficaz para $\rho_{sw} = 0.10\%$, enquanto que para $\rho_{sw} = 0.17\%$ a solução com melhor desempenho foi a de laminados a 60°. As soluções de laminados inclinados foram mais eficazes que as soluções de laminados verticais.

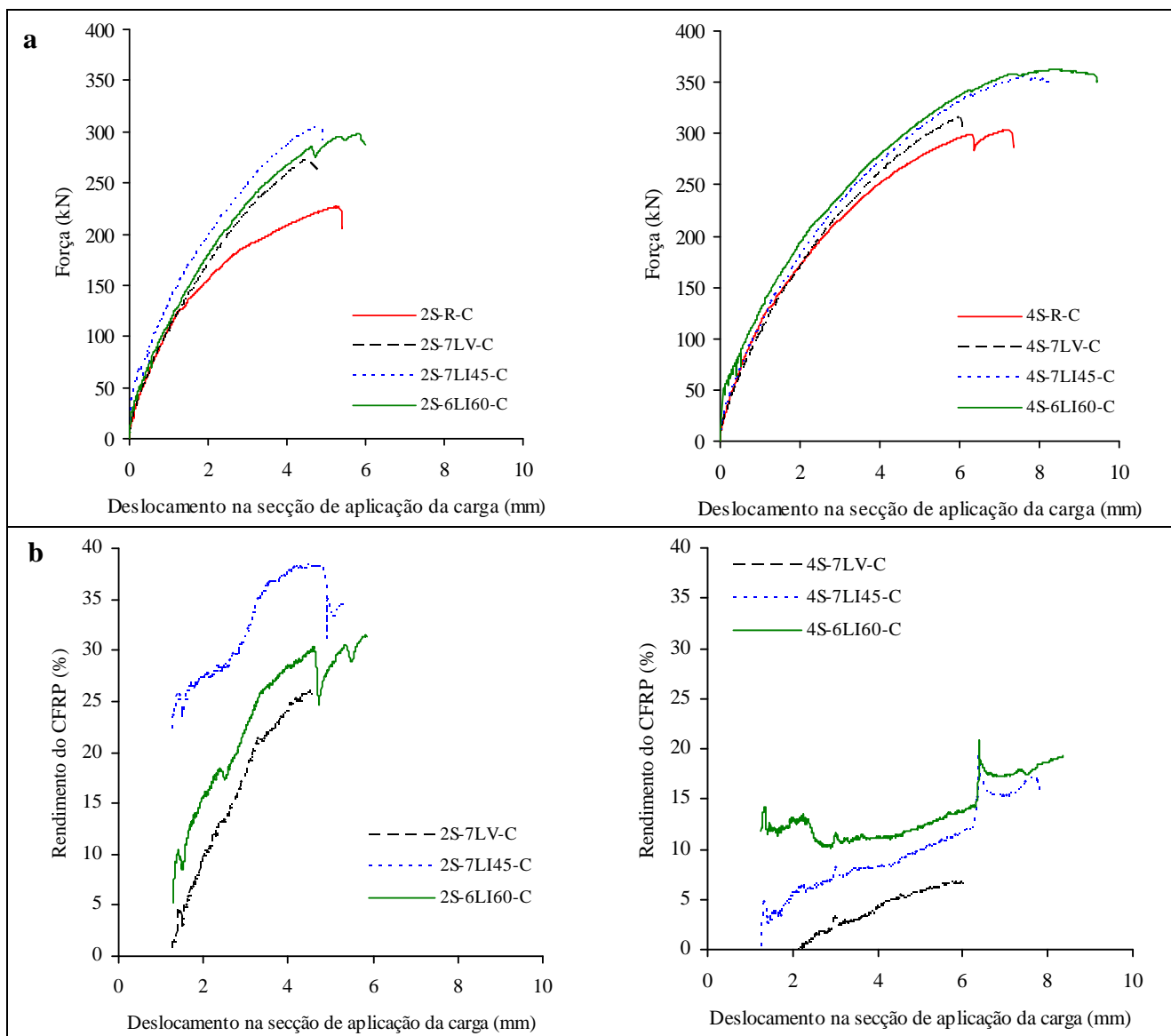


Figura 4.55 - Comportamento das vigas ensaiadas da série C com a maior percentagem de CFRP: a) capacidade de carga; b) rendimento do CFRP.

Na Figura 4.56 apresenta-se, para cada solução de reforço de CFRP testada, o acréscimo de carga máxima obtido na viga com dois estribos de aço no menor vão de corte (coluna da esquerda) e o referido acréscimo quando o reforço foi aplicado numa viga com quatro estribos de aço no menor vão de corte (coluna da direita). Os valores apresentados revelam que, tal como já tinha sido constatado nas vigas da série B, a percentagem de estribos de aço tem um papel significativo nos ganhos de resistência proporcionados pelos reforços de CFRP. Nos resultados obtidos na série C foi bastante evidente a diminuição do grau de eficácia das várias soluções de reforço testadas com o aumento da percentagem de estribos de aço. Em média, o ganho de resistência ($\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$) proporcionado pelas soluções de reforço aplicadas nas vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$ foi 55% do ganho de resistência proporcionado pelas mesmas soluções de reforço quando aplicadas a vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$. O valor desta relação para o caso das vigas testadas na série B foi de 70%, ou seja, constata-se que o efeito da percentagem de armadura transversal foi mais notório para vigas de betão de fraca qualidade.

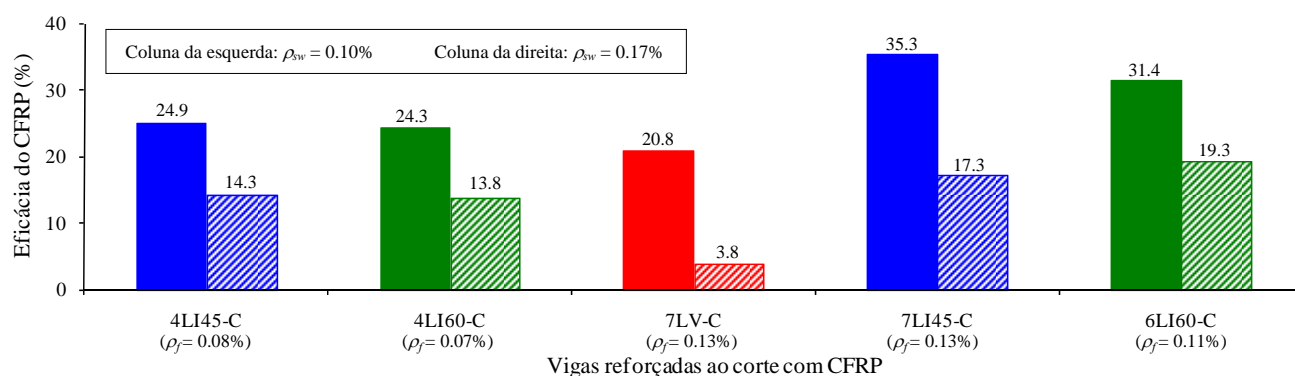


Figura 4.56 - Efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia das soluções de reforço testadas na série de vigas C.

A diminuição da efectividade do reforço com o aumento da percentagem de estribos de aço também se verificou em termos de rigidez conforme pode ser observado nas Figuras 4.54 e 4.55. Se em termos de acréscimo de rigidez e de capacidade de carga máxima, o aumento da percentagem de estribos de aço proporcionou uma diminuição das referidas grandezas, tal não se verificou ao nível da deformação associada à carga máxima que as vigas apresentaram. Com efeito, as soluções de CFRP aplicadas a vigas com ρ_{sw} de 0.10% proporcionaram um valor médio de $u_{F_{max}}$ praticamente igual ao da viga 2S-R-C. As mesmas soluções de reforço aplicadas em vigas com ρ_{sw} igual a 0.17% proporcionaram um valor médio de $u_{F_{max}}$ 9% superior ao valor de $u_{F_{max}}$ da viga 4S-R-C. Na série B a deformação $u_{F_{max}}$ das vigas reforçadas foi bastante superior à das vigas não reforçadas (23% no caso de ρ_{sw} igual a 0.10% e 32% no caso de ρ_{sw} igual a 0.17%). A influência da resistência do betão nos modos de rotura justifica estas diferenças entre as vigas da série B e C.

4.4.4.2 - Modos de rotura

Como era esperado, a rotura por corte acabou por se registar em todas as vigas ensaiadas, tendo ocorrido no menor dos vãos de corte a . Na Figura 4.57 apresentam-se pormenores da zona de rotura das vigas ensaiadas. Nas fotografias da referida figura as linhas verticais correspondem à localização dos estribos de aço e os círculos à posição das secções onde ocorreu a rotura dos estribos durante o ensaio. A título de exemplo apresenta-se nas Figuras 4.58 a 4.61 a sequência dos ensaios das vigas 2S-4LI45-C, 2S-7LI45-C, 4S-4LI45-C e 4S-7LI45-C. Para as restantes vigas a referida sequência pode ser consultada no anexo D. Na Figura 4.62 estão registados alguns pormenores da rotura das vigas da série C reforçadas com CFRP.

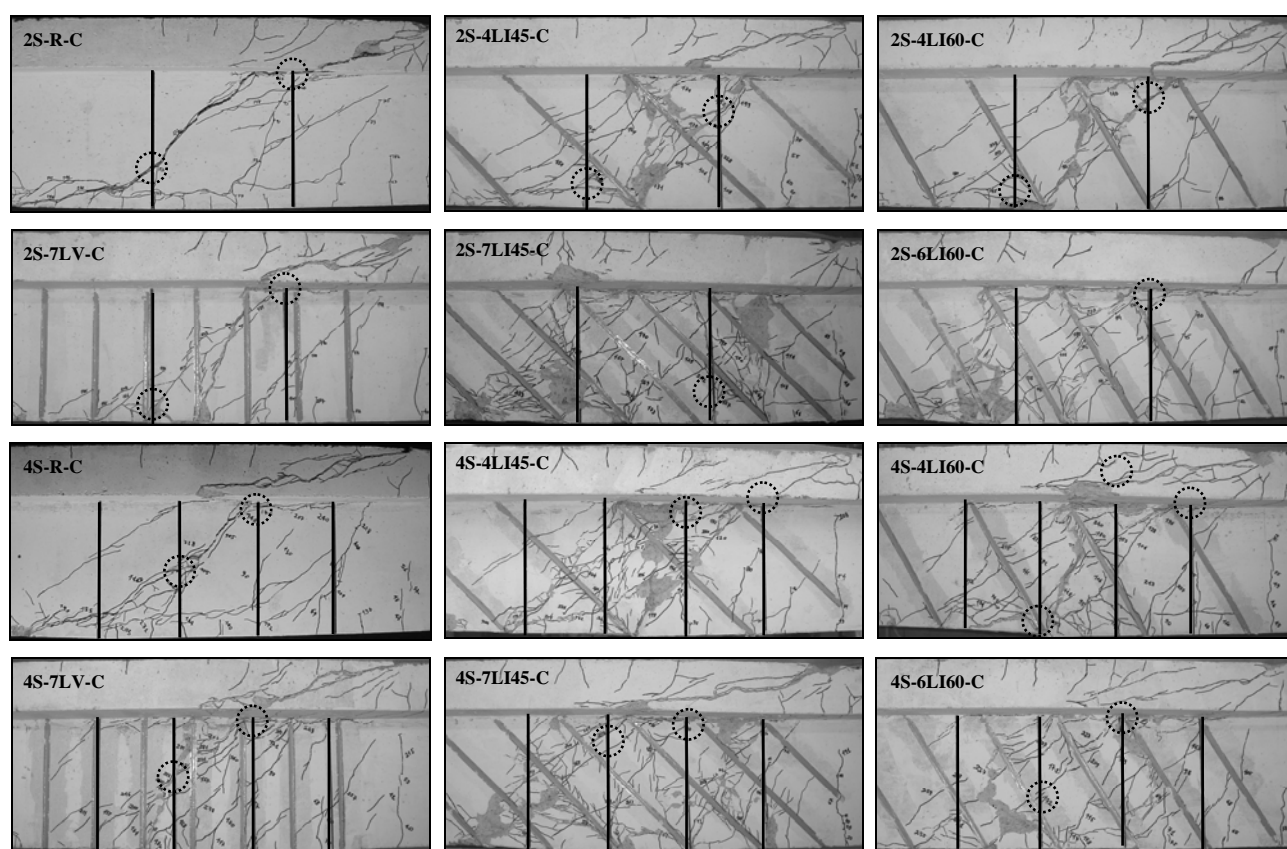


Figura 4.57 - Modos de rotura das vigas da série C.

A viga C-R-C atingiu a sua capacidade máxima com a abertura excessiva da fenda de corte que se formou ao longo do ensaio. Nas vigas 2S-R-C e 4S-R-C a capacidade máxima de carga foi atingida quando ocorreu a rotura de um dos estribos que atravessavam a fenda de rotura de corte. A rotura dos restantes estribos ocorreu após a viga ter atingido a sua carga máxima.

Relativamente às soluções com laminados verticais, enquanto a viga 2S-7LV-C atingiu a sua capacidade máxima de carga imediatamente antes da cedência da parte inferior do laminado central, a viga 4S-7LV-C alcançou a sua carga máxima imediatamente antes de ocorrer a cedência da parte

superior do laminado central. O facto deste laminado apresentar um comprimento de amarração pequeno (6 cm), associado ao facto do betão ser fraco, pode justificar o baixo rendimento do reforço da viga 4S-7LV-C (ver pormenores c), f) e i) da Figura 4.62).

O modo de rotura observado nas vigas com a menor percentagem de CFRP para as soluções de laminados a 45° e a 60° foi idêntico e ocorreu pela cedência da parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga, com destacamento de betão adjacente ao CFRP. De acordo com o ilustrado na Figura 4.57, o padrão de fendilhação das vigas com maior percentagem de estribos (4S-4LI45-C e 4S-4LI60-C) foi mais difuso que o desenvolvido nas vigas com a menor percentagem de estribos de aço (2S-4LI45-C e 2S-4LI60-C). Estando o betão mais fendilhado, a probabilidade das condições de fixação dos reforços serem mais precárias aumenta, o que de certa forma justificou o menor desempenho das soluções de reforço das vigas 4S-4LI45-C e 4S-4LI60-C em relação ao das vigas 2S-4LI45-C e 2S-4LI60-C, respectivamente. Nas vigas 2S-4LI45-C e 2S-4LI60-C antes de se ter atingido a carga máxima verificou-se uma ligeira quebra na sua capacidade de carga (Figura 4.54). No caso da 2S-4LI45-C a referida quebra deveu-se à cedência, cerca dos 272 kN, da parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga (Figura 4.57). Tal como se referiu anteriormente, a carga máxima da viga 2S-4LI45-C foi obtida imediatamente antes da cedência da parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga (lado oposto ao representado na Figura 4.57 e representado nos pormenores a) e b) da Figura 4.62). Quanto à viga 2S-4LI60-C, a quebra da capacidade de carga antes de ter atingido a carga máxima deveu-se ao aparecimento, cerca dos 280 kN, de uma nova fenda diagonal de corte.

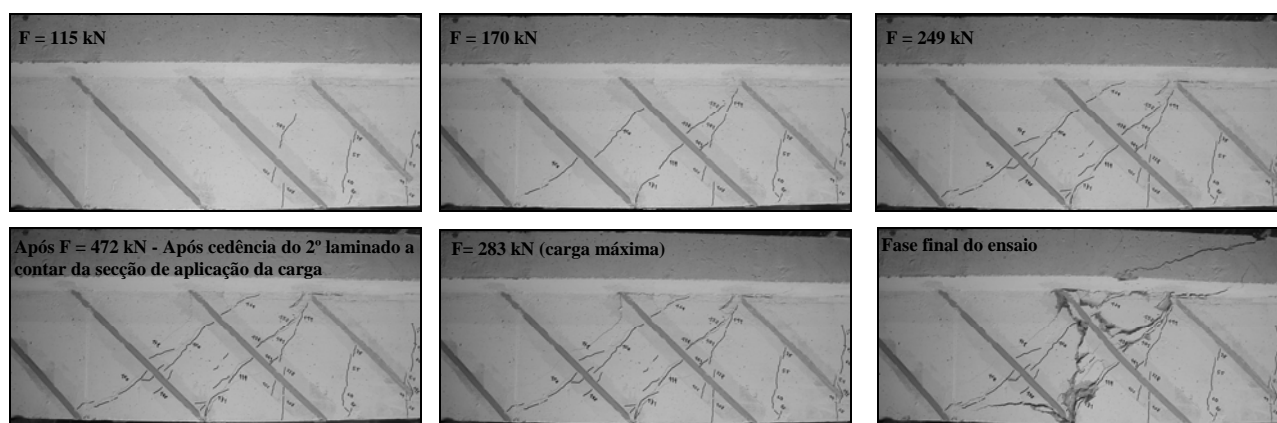


Figura 4.58 - Sequência do ensaio da viga 2S-4LI45-C (carga máxima = 283.0 kN).

O aumento da percentagem de CFRP para as vigas contendo dois estribos de aço no menor vão de corte alterou o padrão de fendilhação que se instalou nas vigas durante o carregamento, o que teve consequências no modo de rotura das vigas. A carga máxima da viga 2S-7LI45-C (Figura 4.59) ocorreu quando surgiu uma fenda de corte que provocou a diminuição da capacidade de carga.

Apesar desta voltar a aumentar, não consegui atingir valores superiores à carga que originou a referida fenda de corte. Na viga 2S-6LI60-C, antes de ser alcançada a carga máxima, ocorreram duas perdas momentâneas de capacidade de carga, associadas à formação de fendas de corte para níveis de carregamento elevado. A carga máxima foi atingida imediatamente antes de ter ocorrido o destacamento da parte superior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga. O padrão de fendilhação instalado, a percentagem de CFRP existente e o facto de o betão ser fraco proporcionaram o destacamento de uma parede de betão mais CFRP. A formação deste tipo de parede também ocorreu na viga 2S-7LI45-C.

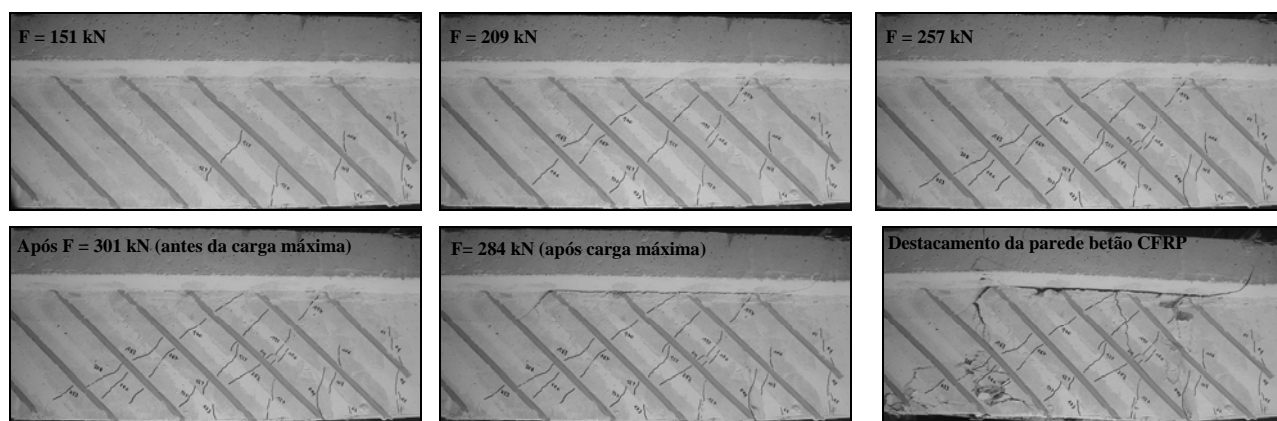


Figura 4.59 - Sequência do ensaio da viga 2S-7LI45-C (carga máxima = 306.5 kN).

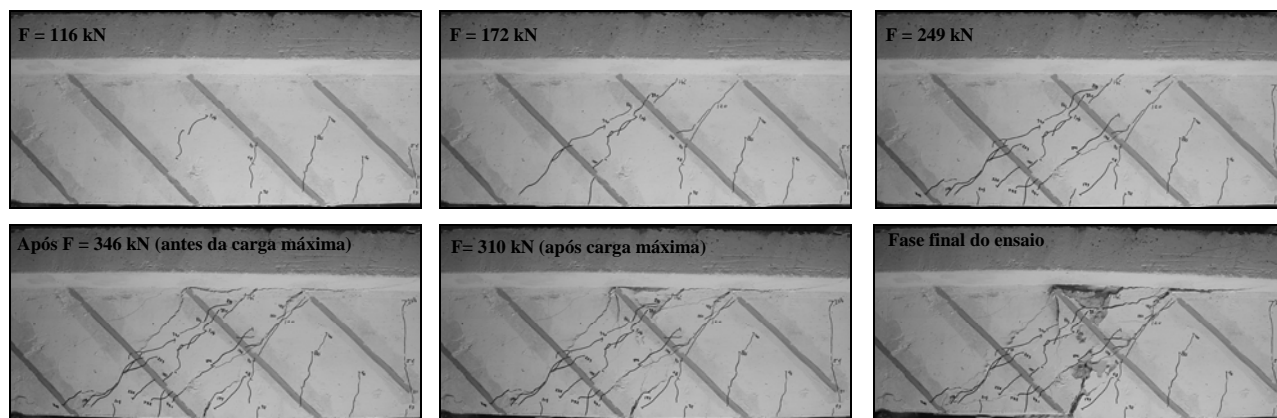


Figura 4.60 - Sequência do ensaio da viga 4S-4LI45-C (carga máxima = 347.2 kN).

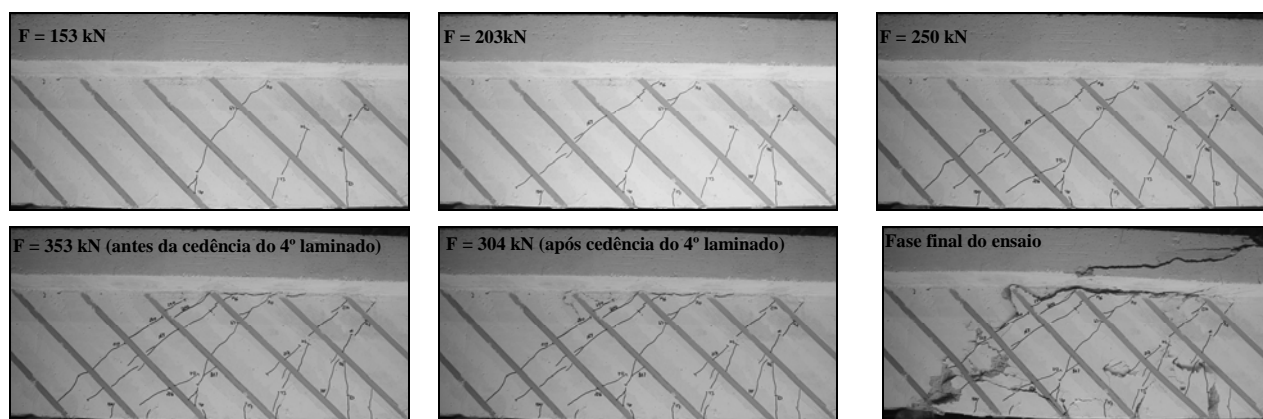


Figura 4.61 - Sequência do ensaio da viga 4S-7LI45-C (carga máxima = 356.4 kN).

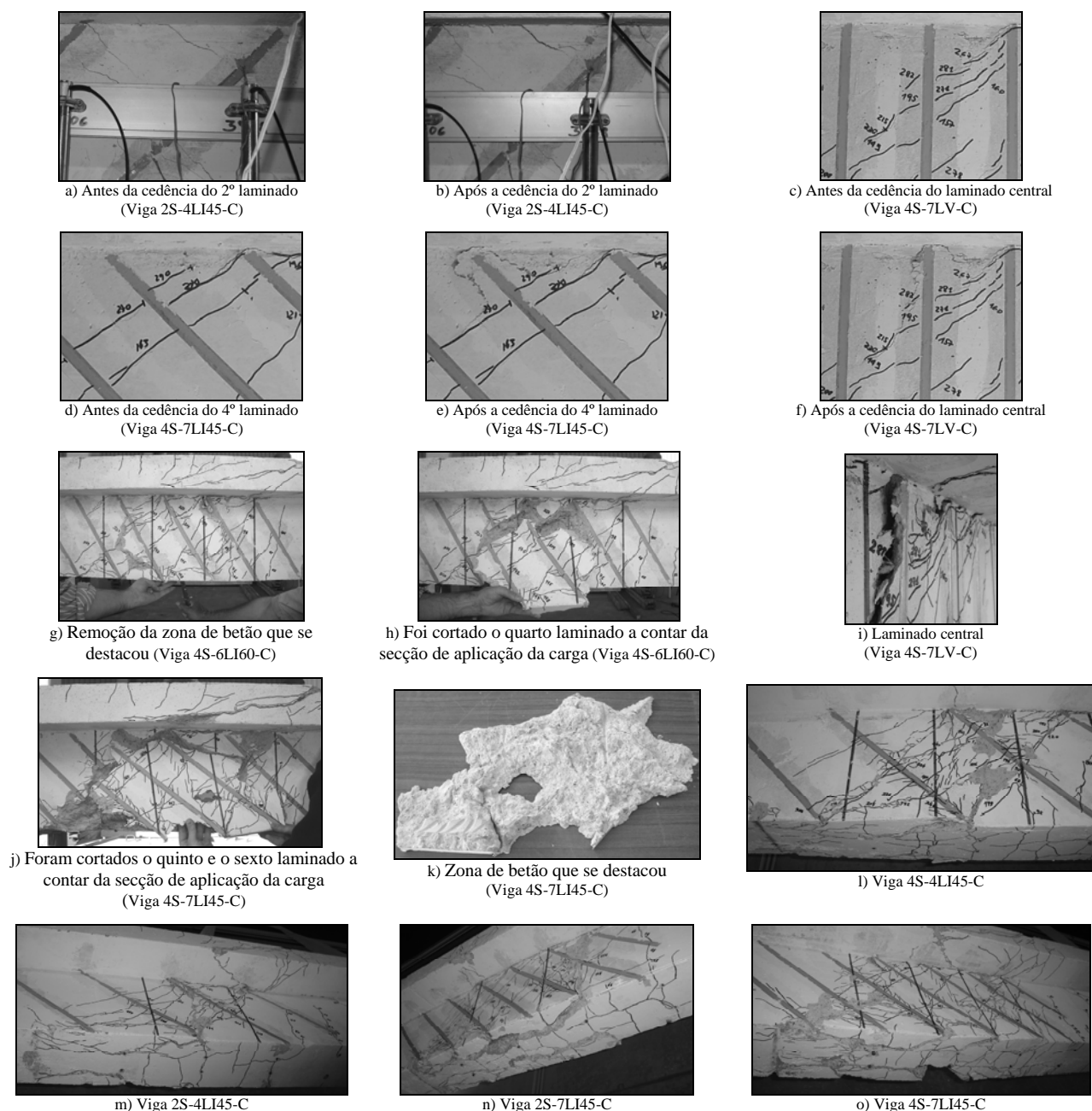


Figura 4.62 - Vários pormenores da rotura das vigas da série C reforçadas com CFRP.

A carga máxima da viga 4S-7LI45-C ocorreu imediatamente antes de se dar a cedência da parte superior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga (ver Figura 4.61 e os pormenores d) e e) da Figura 4.62). Esta carga ocorreu quando o deslocamento na secção de aplicação da carga era de 7.69 mm. Para um deslocamento de 12.42 mm a carga era 95% da carga máxima, o que indicia o comportamento dúctil que a viga apresentou, e que resultou do processo de destacamento de uma parede de betão mais CFRP, de acordo com o representado na Figura 4.61 e nos pormenores j) e k) da Figura 4.62. O modo de rotura da viga 4S-6LI60-C esteve associado ao destacamento de uma parede betão mais CFRP que se formou com o carregamento da viga a partir da

extremidade inferior do terceiro laminado a contar da secção da carga (ver os pormenores g) e h) da Figura 4.62).

4.4.4.3 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais

Na Tabela 4.18 apresentam-se, para cada viga reforçada, os valores das extensões registados nos quatro extensómetros colados em cada um dos CFRP instrumentados (CFRP A e CFRP B) correspondentes à carga máxima (F_{max}). Para o caso em que a extensão máxima nos CFRP ocorreu para uma carga inferior a F_{max} , os valores registados nos extensómetros nesse instante encontram-se entre parêntesis curvos (ver Figuras 4.7 e 4.53). O CFRP A era o que estava posicionado mais próximo da secção de aplicação da carga e o CFRP B era o que está mais próximo do apoio. Além do que foi referido, na Tabela 4.18 apresenta-se para cada viga reforçada, o valor da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados antes das vigas atingirem a rotura (ε_{CFRP}^{max}), bem como, o valor médio das extensões máximas registadas nos dois CFRP instrumentados (ε_{CFRP}^{max})_m.

Da análise dos dados da Tabela 4.18 é possível verificar que o valor máximo das extensões registadas nas vigas reforçadas com CFRP variou entre os 5.4‰ (viga 4S-6LI60-C) e os 9.4‰ (viga 2S-4LI45-C). No que diz respeito à extensão (ε_{CFRP}^{max})_m, a variação foi entre os 4.1‰ (4S-7LV-C) e os 8.8‰ (viga 4S-4LI45-C). A média dos valores máximos de ε_{CFRP}^{max} e dos valores de (ε_{CFRP}^{max})_m para as vigas com CFRP ensaiadas na presente série foi de 7.2‰ e 6.2‰, respectivamente. À semelhança do ocorrido nas vigas das séries anteriores, os valores mais elevados das extensões no CFRP registaram-se nas vigas com a menor percentagem de CFRP.

Em termos de orientação do CFRP, a solução com laminados a 45° foi a que mais mobilizou a capacidade resistente do CFRP. Com efeito, considerando a máxima extensão ε_{CFRP}^{max} por viga para as quatro soluções de laminados a 60° verifica-se que o seu valor médio foi de 8.1‰, ou seja, 50% da extensão máxima obtida nos ensaios de tracção directa dos laminados (16.3‰ - Tabela 4.16). As soluções de laminados verticais e de laminados inclinados a 60° conduziram, em termos médios, a uma mobilização do reforço de cerca de 39% (extensão de 6.4‰) e 41% (extensão de 6.7‰), respectivamente.

Por forma a ilustrar a variação das extensões registadas nos laminados e no estribo de aço que continham extensómetros eléctricos, durante o processo de carregamento de uma viga até ao instante em que atinge a sua capacidade de carga máxima, na Tabela 4.19 apresentam-se os valores das referidas extensões para diferentes níveis de carga da viga 4S-4LI45-C. O valor máximo da extensão

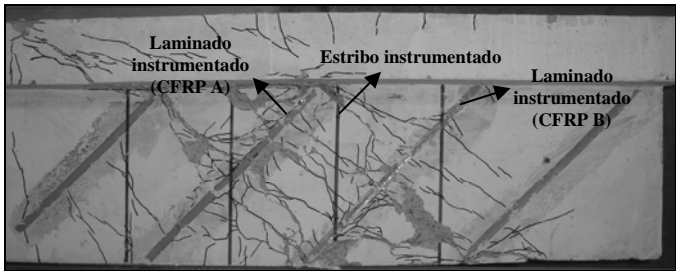
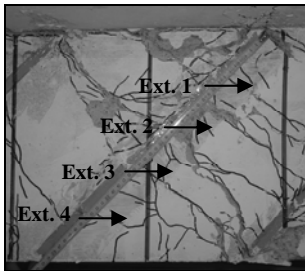
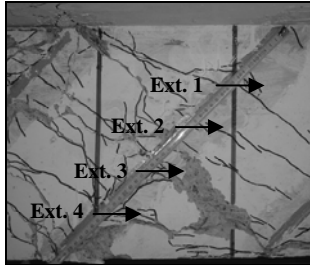
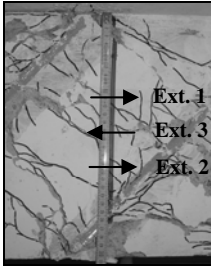
registada no CFRP A foi de 8.4‰ (Ext.2 e Ext.3) e no CFRP B foi de 9.3‰ (Ext.2). Os referidos extensómetros foram os mais solicitados por serem os que estavam, para cada um dos laminados instrumentados, mais próximos da fenda de rotura de corte. Os valores apresentados para o Ext.1 do CFRP B permitem constatar que houve um forte incremento na extensão que se deve à formação de uma fenda de corte. Na Tabela 4.19 apresentam-se os valores das extensões registadas no estribo instrumentado da viga 4S-4LI45-C e da viga 4S-R-C para três níveis de carga, sendo possível constatar que o estribo da viga sem reforço de CFRP apresentou extensões mais elevadas. Esta ocorrência foi devida ao facto do reforço de CFRP ter atrasado a progressão da abertura de fenda de corte.

Tabela 4.18 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP (série C).

Viga	CFRP	$\varepsilon_{Ext.1}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.2}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.3}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.4}$ [‰]	ε_{CFRP}^{max} [‰]	$(\varepsilon_{CFRP}^{max})_m$ [‰]
2S-7LV-C	A	5.21	5.72	5.40	4.42	5.72	4.9
	B	-	-	3.99	3.17	3.99	
2S-4LI45-C	A	7.31	8.92	9.43	-	9.43	7.2
	B	-	1.44	4.97	3.48	4.97	
2S-7LI45-C	A	1.35	6.50	2.35	2.62	6.50	5.3
	B	0.12	1.16	4.04	2.70	4.04	
2S-4LI60-C	A	3.30	7.03	6.13	-	7.03	6.9
	B	-	5.65	6.81	5.03	6.81	
2S-6LI60-C	A*	5.55 (5.70)	6.25 (6.49)	5.03 (5.15)	2.39 (2.34)	6.49	5.9
	B*	2.30 (0.25)	-	4.56 (5.32)	3.51 (3.80)	5.32	
4S-7LV-C	A	2.40	7.08	6.69	2.74	7.08	4.1
	B*	0.03 (-)	0.49 (0.17)	-	0.68 (1.09)	1.09	
4S-4LI45-C	A	5.81	8.40	8.40	3.63	8.40	8.8
	B	8.23	9.29	8.13	5.82	9.29	
4S-7LI45-C	A	7.13	5.27	2.10	3.16	7.13	6.0
	B	2.41	4.65	4.96	4.29	4.96	
4S-4LI60-C	A	5.82	7.16	5.73	2.05	7.16	7.5
	B	2.51	7.78	6.79	-	7.78	
4S-6LI60-C	A*	4.46 (4.28)	4.52 (4.52)	4.15 (4.98)	2.35 (4.46)	4.98	5.2
	B*	1.63 (5.23)	4.18 (5.36)	4.79 (4.99)	3.46 (3.10)	5.36	

* Os valores das extensões entre parênteses referem-se à carga para a qual ocorreu a máxima extensão no CFRP instrumentado antes da carga máxima (295.5 kN no CFRP A da viga 2S-6LI60-C, 267.9 kN no CFRP B da viga 2S-6LI60-C, 206.2 kN no CFRP B da viga 4S-7LV-C, 357.8 kN no CFRP A da viga 4S-6LI60-C, 341.5 kN no CFRP B da viga 4S-6LI60-C).

Tabela 4.19 - Variação das extensões no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-4LI45-C (valores das extensões em ‰).

Descrição								
Reforço ao corte com CFRP constituído por quatro laminados inclinados a 45° em cada face da viga.								
A carga máxima atingida foi de $F_{max} = 347.2$ kN imediatamente antes da cedência da parte superior do segundo laminado a contar da secção da carga.								
CFRP A		Ext.	F =150 kN	F =200 kN	F =250 kN	F =300 kN	F =340 kN	F =347.2 kN
		1	1.1	2.1	3.3	6.1	5.3	5.8
		2	0.2	1.1	3.9	6.8	7.8	8.4
		3	0.9	2.0	3.3	5.8	7.8	8.4
		4	0.3	0.5	0.7	1.1	2.2	3.6
CFRP B		Ext.	F =150 kN	F =200 kN	F =250 kN	F =300 kN	F =340 kN	F =347.2 kN
		1	0.0	0.0	0.1	0.2	6.2	8.2
		2	0.1	0.2	0.5	1.8	7.9	9.3
		3	1.7	3.2	4.2	5.8	7.4	8.1
		4	0.8	1.2	3.3	4.3	5.2	5.8
Estribo de aço		Ext.	F =150 kN	F =200 kN	F =250 kN	F =300 kN	F =340 kN	F =347.2 kN
		1 ^a	0.6 (1.4)	1.5 (2.3)	2.2 (2.7)	3.8 (3.5)	0.8	0.6
		2 ^a	0.7 (1.9)	1.0 (4.5)	1.8 (6.8)	2.8 (8.4)	4.3	3.7
		3 ^b	0.8	1.8	2.6	0.9	0.6	0.3

Nota: Na identificação da localização dos extensómetros colados no estribo a seta que aponta para a esquerda indica que o extensómetro está do lado oposto ao representado na fotografia. ^a Valores entre parêntesis referem-se à viga 4S-R-C cujo valor de F_{max} foi igual a 303.8 kN. ^b Este extensómetro não funcionou na viga sem CFRP.

Nas Figuras 4.63 e 4.64 apresenta-se, respectivamente, a variação ocorrida, durante o ensaio da viga 4S-4LI45-C, das extensões nos laminados e estribo de aço que foram instrumentados. Estas figuras permitem comprovar que numa fase inicial do carregamento os elementos resistentes ao esforço transversal não foram activados. Tal ocorreu apenas no instante em que foram atravessados por uma fenda de corte. O primeiro laminado solicitado foi o CFRP A (Ext.3) para uma carga cerca dos 70 kN (formação de uma fenda de corte que também originou alguma extensão no Ext.4). Entre os 100 kN e os 120 kN, com o surgimento de uma fenda de corte, foram activados de forma significativa os dois laminados instrumentados, nomeadamente nas proximidades da referida fenda (Ext.1 do CFRP A e Ext.3 do CFRP B). Foi para este nível de carga que também se registou a activação do estribo de aço instrumentado. O aumento do carregamento provocou o aparecimento de novas fendas de corte cujo

efeito é visível na variação dos valores registados no Ext.2 do CFRP A e nos Ext.3 e Ext.4 do CFRP B. Para uma carga próxima dos 311 kN é possível verificar na Figura 4.63 a ocorrência de um momentâneo decréscimo do valor da extensão registada no Ext.1 do CFRP A e um aumento significativo da extensão no Ext. 1 do CFRP B. Este facto esteve associado à formação de uma nova fenda de corte que atravessou o laminado B nas proximidades onde foi colado o Ext.1 (ver Figura da Tabela 4.19). O registo das extensões no estribo de aço instrumentado ao longo do ensaio permitiu constatar que a armadura transversal atingiu a cedência.

A informação do registo das extensões nos laminados e estribos instrumentados das restantes vigas da série C está apresentada no anexo C desta dissertação. A análise dos dados referentes à extensometria colocada nos estribos permitiu concluir que em todas as vigas com CFRP a carga máxima foi atingida com as armaduras transversais que foram instrumentadas com extensómetros em cedência.

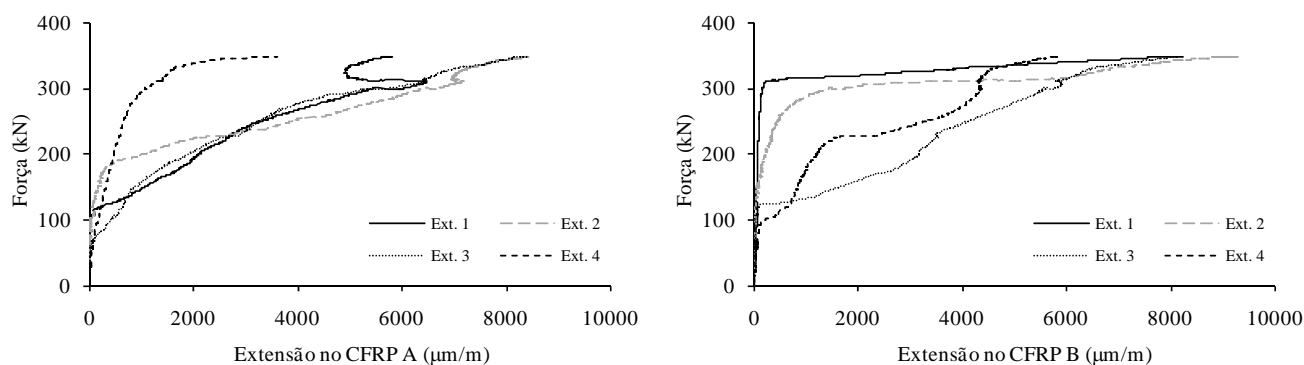


Figura 4.63 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima (viga 4S-4LI45-C).

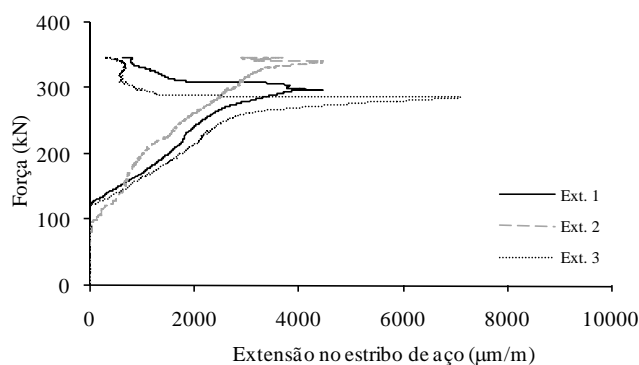


Figura 4.64 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 4S-4LI45-C).

4.4.4.4 - Efeito do tipo de betão

As dez soluções de reforço de CFRP testadas na série C foram também ensaiadas em vigas da série B e a única diferença entre as séries foi a classe do betão, quantificada por intermédio do valor da resistência à compressão em cilindros à data do ensaio das vigas ($f_{cm} = 39.7$ MPa na série B e $f_{cm} = 18.6$ MPa na série C).

Na Tabela 4.20 apresenta-se o desempenho de cada solução de CFRP testada em termos do acréscimo de carga máxima que a presença do reforço proporcionou. Os valores da Tabela 4.20 evidenciam a existência de uma interacção entre a qualidade do betão e o grau do benefício que o reforço de CFRP proporciona ao nível do incremento da capacidade máxima resistente das vigas. De um modo geral, verificou-se que o aumento da qualidade do betão potencia o efeito do reforço de CFRP. Das dez soluções testadas, em nove o reforço de CFRP aplicado em vigas com f_{cm} igual a 39.7 MPa (série B) proporcionou maiores aumentos da capacidade de carga máxima do que, quando o mesmo reforço, foi aplicado a vigas com f_{cm} igual a 18.6 MPa (série C). O decréscimo do desempenho do reforço de CFRP com a diminuição da qualidade do betão foi mais evidente nas vigas com maior percentagem de armadura transversal, o que significa que a interacção detrimental CFRP-estribos acentua-se com o aumento da percentagem de estribos.

Tabela 4.20 - Efeito do tipo de betão (análise comparativa).

Percentagem de reforço de CFRP	Vigas ($f_{cm} = 39.7$ MPa)	$E1 = \Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ [%]	Vigas ($f_{cm} = 18.6$ MPa)	$E2 = \Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ [%]	E1/E2
0.08	2S-7LV-B	23.1	2S-7LV-C	20.8	1.11
0.08	2S-4LI45-B	29.3	2S-4LI45-C	24.9	1.18
0.07	2S-4LI60-B	27.2	2S-4LI60-C	24.3	1.12
0.13	2S-7LI45-B	38.8	2S-7LI45-C	35.3	1.10
0.11	2S-6LI60-B	29.8	2S-6LI60-C	31.4	0.95
0.08	4S-7LV-B	15.1	4S-7LV-C	3.8	3.97
0.08	4S-4LI45-B	19.1	4S-4LI45-C	14.3	1.34
0.07	4S-4LI60-B	19.5	4S-4LI60-C	13.8	1.41
0.13	4S-7LI45-B	28.7	4S-7LI45-C	17.3	1.66
0.11	4S-6LI60-B	23.2	4S-6LI60-C	19.3	1.21

O decréscimo do grau de eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo com a diminuição da qualidade do betão foi visível em mais dois aspectos. O primeiro relaciona-se com o nível de deformação que as vigas atingiram na rotura. Ao contrário do que aconteceu na série B, onde a carga máxima das vigas reforçadas ocorreu para flechas de valores superiores à atingida pelas vigas sem reforço, na série C a carga máxima das vigas com laminados de CFRP foi atingida para uma flecha semelhante à das vigas não reforçadas, sendo em alguns casos mesmo inferior. Assim, verificou-se uma antecipação da rotura das vigas da série C quando comparada com o que se verificou nas vigas da série B. O segundo aspecto está associado ao nível de mobilização do reforço de CFRP. O valor médio da máxima extensão registada nos laminados instrumentados (ε_{CFRP}^{max}) das dez vigas da série B

(ver Tabela 4.20) foi de 9.0‰ enquanto que para as dez vigas da série C (ver Tabela 4.20) o referido valor foi de 7.2‰.

Os modos de rotura que tipicamente se registaram nas vigas das séries B e C (o mesmo aconteceu na série A) foram condicionados pelo betão. Sendo assim, o grau de eficácia do reforço está directamente associado à qualidade do betão, o que vem ao encontro das constatações que anteriormente foram efectuadas.

4.4.4.5 - Considerações sobre os resultados obtidos na série C

A realização dos ensaios das vigas da série C e os resultados que foram obtidos permitiu, desde logo, avançar com algumas considerações, que serão tidas em conta no Capítulo 5 referente à análise geral dos resultados do programa experimental descrito ao longo deste capítulo, e que se passam a expor:

- O uso da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da percentagem de armadura transversal (estribos de aço) e da orientação e percentagem do CFRP, permitiu aumentar a capacidade de carga de vigas de betão armado de secção em T com rotura por corte. As soluções de reforço de CFRP testadas, correspondentes a percentagens de CFRP que variaram entre os 0.07% e os 0.13%, proporcionaram, com a excepção de um modelo, um aumento da capacidade máxima de carga que variou entre os 14% e os 35%. Em termos do acréscimo relativo de carga entre a formação da fenda de corte nas vigas de referência e a carga de rotura das vigas reforçadas, $(\Delta F / F^{ref})_{max}$, as soluções de reforço testadas, com a excepção anteriormente referida, conduziram a valores entre 14% e 39%. Desta forma, verifica-se que é viável a aplicação da técnica de reforço ao corte em análise para os casos em que o betão apresente uma resistência baixa.
- Os ganhos de resistência proporcionados pelos sistemas de reforço em CFRP adoptados foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, maiores valores de ρ_f garantiram maiores aumentos da capacidade resistente. Em termos de orientação dos laminados, as soluções com laminados inclinados tiveram desempenhos semelhantes e claramente superiores ao garantido pela solução de laminados verticais.
- A extensão máxima no CFRP registada nos laminados instrumentados variou entre os 5.4‰ e os 9.4‰. Em termos médios o valor da referida extensão para as vigas reforçadas da série C foi de 7.2‰, o que correspondeu a um grau de mobilização do reforço de 44%. A cedência das

armaduras transversais instrumentadas no momento em que as vigas atingiram a sua capacidade máxima de carga foi verificada nas vigas reforçadas com CFRP.

- A percentagem de armadura transversal influencia a eficácia da técnica de reforço ao corte com laminados inseridos. As soluções de CFRP aplicadas a vigas com uma percentagem de estribos de aço de 0.17% conduziram a acréscimos de carga máxima de valor igual a 55% do obtido pelas mesmas soluções de reforço mas aplicadas a vigas com uma percentagem de estribos de aço de 0.10%. O facto da relação anteriormente referida (55%) ter tido um valor de 70% para o caso das vigas da série B indicia uma maior vulnerabilidade ao efeito da percentagem da armadura transversal na eficácia das soluções de CFRP quando aplicadas em vigas de betão de baixa resistência.
- As dez soluções de reforço analisadas na série C, em que as vigas tinham um betão com um valor de f_{cm} igual a 18.6 MPa, foram também testadas em vigas com um betão caracterizado por ter um valor de f_{cm} igual a 39.7 MPa (série B). A comparação dos resultados obtidos permite concluir que as vigas da série C tiveram menores valores do acréscimo de carga máxima, de deformação máxima na rotura e do grau de mobilização do reforço de CFRP. Desta forma se conclui que a presença de betões de fraca resistência potencia menores desempenhos das soluções de reforço de CFRP.
- As vigas da série C reforçadas com a menor percentagem de CFRP atingiram a sua capacidade de carga máxima quando ocorreu o destacamento de um laminado que continha um volume de betão adjacente, ou seja, o elemento condicionante da rotura das referidas vigas foi o betão. Este modo de rotura também se registou nas vigas das séries anteriores. No entanto, no caso das vigas da série C, pelo facto de se estar na presença de um betão fraco o referido modo de rotura ocorreu mais prematuramente, o que teve consequência directa na eficácia do reforço. Para as vigas com a maior percentagem de CFRP houve a formação de uma parede constituída por “betão mais CFRP” que se destacou, resultante de um efeito de grupo provocado pelo padrão de fendilhação que se formou e pela proximidade dos laminados. Trata-se de um modo de rotura mais penalizante que o verificado nas vigas com a menor percentagem de CFRP e mais penalizante se torna com a presença de um betão fraco. Face ao exposto, é possível adiantar que na utilização da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento se deve ter em consideração o espaçamento mínimo a adoptar entre laminados consecutivos.

4.5 - SÉRIE D

A última das séries de vigas ensaiadas no âmbito do programa experimental, que tem vindo a ser apresentado neste capítulo, foi direccionada para a análise do efeito do parâmetro a/d na eficácia da técnica de reforço ao corte com CFRP em estudo, sendo a o vão de corte da viga e d altura útil da secção transversal da viga. Desta forma, algumas das soluções de reforço estudadas na série B ($a/d = 2.5$) foram aplicadas a vigas com uma relação a/d igual a 3.3 ($a/d = 3.3$). Um outro aspecto que também foi analisado na série D esteve associado ao facto de que um dos mais hipotéticos cenários que se pode encontrar numa intervenção de reforço de estruturas existentes é a presença de betões em estado fendilhado. Neste sentido, o desempenho da técnica de reforço em análise foi avaliado por intermédio de um conjunto de ensaios em vigas de betão armado, com e sem fendilhação inicial do betão antes da aplicação do CFRP.

4.5.1 - Concepção dos modelos

Na série D foram testadas dezassete vigas de betão armado de secção transversal em T que continham dois varões de 32 mm de diâmetro ($2\phi 32$) e dois varões de 16 mm de diâmetro ($2\phi 16$) colocados longitudinalmente na face traccionada, de acordo com a disposição representada na Figura 4.65. As vigas tinham um vão livre de 2.4 m, vãos de corte a e b de 1.2 m e relação a/d de 3.3. De forma a evitar que a rotura por corte ocorresse no vão de corte b foram aí colocados estribos verticais (dois ramos) de 8 mm de diâmetro afastados de 80 mm ($\phi 8@80\text{mm}$). As diferenças entre modelos ficaram unicamente restritas ao vão de corte a , concretamente, na forma como foi aí garantida a resistência ao esforço transversal (Figura 4.66). O aumento da capacidade portante em termos de flexão e de esforço transversal no vão de corte b , em relação ao adoptado nas vigas das séries anteriores, foi justificado pela necessidade de impor o modo de rotura por corte, no vão de corte a , face à alteração ocorrida na geometria do modelo estrutural das vigas. O grupo de modelos ensaiados nesta série englobou: uma viga sem qualquer reforço ao corte (C-R-D); uma viga com estribos $\phi 6@300\text{mm}$ (viga 3S-R-D com ρ_{sw} de 0.10%); oito vigas contendo estribos $\phi 6@300\text{mm}$ e reforçadas ao corte com CFRP; uma viga com estribos $\phi 6@200\text{mm}$ (viga 5S-R-D com ρ_{sw} de 0.16%); e seis vigas contendo estribos $\phi 6@200\text{mm}$ e reforçadas ao corte com CFRP. Na Figura 4.67 estão ilustradas as armaduras adoptadas nas vigas da série D.

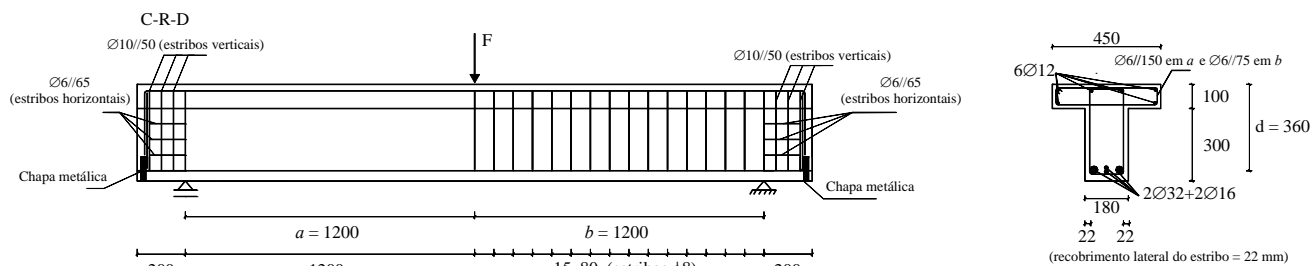


Figura 4.65 - Geometria das vigas da série D (dimensões em mm).

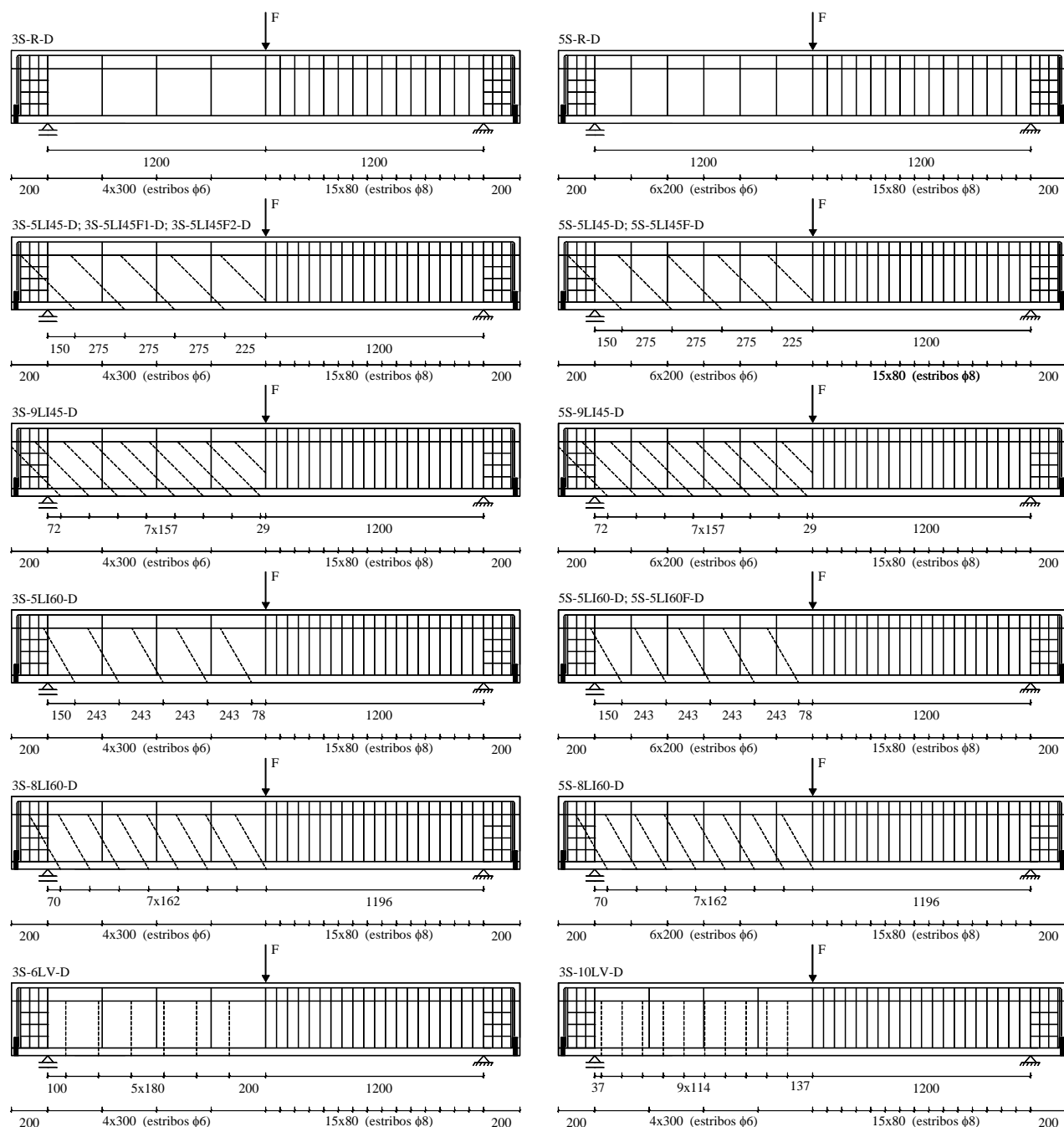


Figura 4.66 - Vigas ensaiadas da série D: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado).

Tabela 4.21 - Informações gerais sobre os modelos de vigas da série D.

Viga	Sistema de reforço ao corte no vão de corte a				
	Material	Quantidade	Porcentagem [%] [*]	Espaçamento [mm]	Ângulo [°]
C-R-D	-	-	-	-	-
3S-R-D	Estribos de aço	3 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
3S-6LV-D	Estribos de aço	3 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x6 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	180	90
3S-10LV-D	Estribos de aço	3 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x10 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	114	90
3S-5LI45-D	Estribos de aço	3 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	275	45
3S-5LI45F1-D	Estribos de aço	3 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
**	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	275	45
3S-5LI45F2-D	Estribos de aço	3 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
**	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	275	45
3S-9LI45-D	Estribos de aço	3 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x9 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	157	45
3S-5LI60-D	Estribos de aço	3 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.07	243	60
3S-8LI60-D	Estribos de aço	3 ϕ 6 de dois ramos	0.10	300	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x8 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.11	162	60
5S-R-D	Estribos de aço	5 ϕ 6 de dois ramos	0.10	200	90
5S-5LI45-D	Estribos de aço	5 ϕ 6 de dois ramos	0.16	200	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	275	45
5S-5LI45F-D	Estribos de aço	5 ϕ 6 de dois ramos	0.16	200	90
**	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.08	275	45
5S-9LI45-D	Estribos de aço	5 ϕ 6 de dois ramos	0.16	200	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x9 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.13	157	45
5S-5LI60-D	Estribos de aço	5 ϕ 6 de dois ramos	0.10	200	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.07	243	60
5S-5LI60F-D	Estribos de aço	5 ϕ 6 de dois ramos	0.10	200	90
**	Laminados de CFRP (NSM)	2x5 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.07	243	60
5S-8LI60-D	Estribos de aço	5 ϕ 6 de dois ramos	0.10	200	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2x8 laminados (1.4x9.5 mm ²)	0.11	162	60

* A porcentagem de estribos de aço foi obtida usando a expressão (2.5) e a porcentagem de reforço de CFRP foi obtida usando a expressão (3.1).

** Vigas em que previamente à aplicação do reforço foi imposto um determinado padrão de fendilhagem.

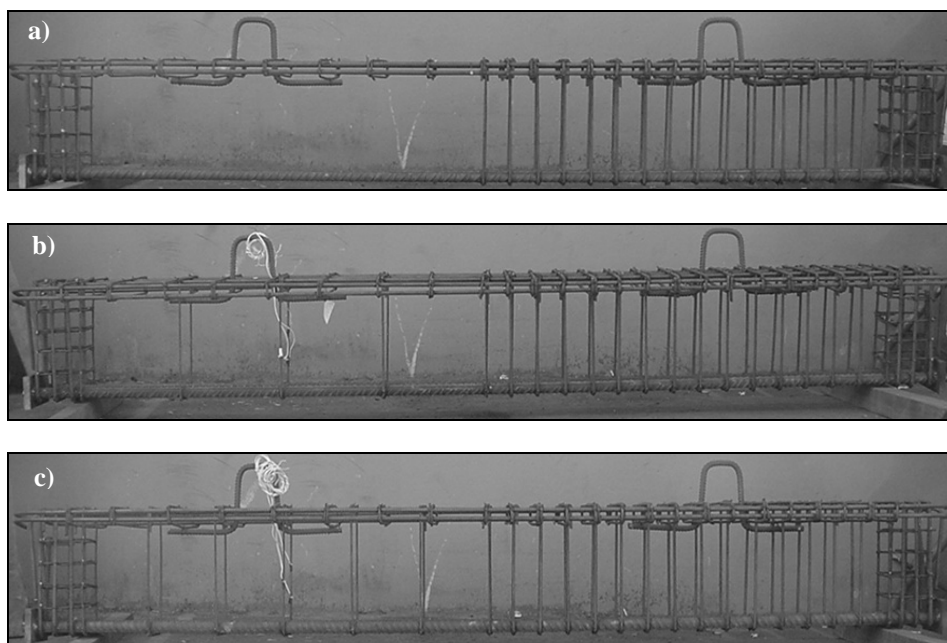


Figura 4.67 - Armaduras das vigas da série D: a) viga C-R-D; b) vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ no vão de corte a ; c) vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$ no vão de corte a .

Nos oito modelos com estribos $\phi 6@300\text{mm}$ ($\rho_{sw} = 0.10\%$) contendo CFRP foram aplicadas seis soluções de reforço já adoptadas nas seguintes vigas da série B (ver Tabela 4.7 e Figura 4.24): 2S-4LV-B ($\rho_f = 0.08\%$) e 2S-7LV-B ($\rho_f = 0.13\%$) para o caso de laminados verticais; 2S-4LI45-B ($\rho_f = 0.08\%$) e 2S-7LI45-B ($\rho_f = 0.13\%$) para laminados a 45° ; 2S-4LI60-B ($\rho_f = 0.07\%$) e 2S-6LI60-B ($\rho_f = 0.11\%$) para laminados a 60° . Assim, na série de vigas D foram analisadas três orientações para o reforço (laminados verticais, inclinados a 45° e a 60°) e, para cada uma delas, duas gamas de percentagens de CFRP. As referidas soluções de reforço aplicadas em vigas que tinham um vão de corte a de 1.2 m (série D), em vez de 0.9 m (série B), conduziram a um maior número de laminados a inserir em cada face do mencionado vão (Tabela 4.21 e Figura 4.66). Para a percentagem mais alta de CFRP foram executadas as seguintes soluções: dez laminados em cada face da viga para o caso do reforço disposto na vertical, nove laminados em cada face da viga para o caso do reforço disposto com uma inclinação de 45° e oito laminados em cada face da viga para o caso do reforço inclinado a 60° . Para a menor percentagem de CFRP as soluções de reforço executadas foram as seguintes: seis laminados em cada face da viga para o caso do reforço disposto na vertical e cinco laminados em cada face da viga para o caso dos reforços inclinados a 45° e a 60° .

De forma a avaliar, para vigas com $a/d = 3.3$, o efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia do CFRP, quatro das soluções de reforço adoptadas para as vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ (as soluções com laminados inclinados) foram também aplicadas em vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$ ($\phi 6@200\text{mm}$). A solução referente à menor percentagem de laminados de CFRP inclinados a 45° foi,

também, executada em vigas pré-fendilhadas antes da aplicação do reforço: em duas vigas com uma percentagem de armadura transversal de $\rho_{sw} = 0.10\%$ e numa viga com $\rho_{sw} = 0.16\%$. O reforço referente à menor percentagem de laminados de CFRP inclinados a 60° foi, também, aplicado numa viga pré-fendilhada com ρ_{sw} de 0.16% .

Na Tabela 4.21 e nas Figuras 4.65 e 4.66 apresentam-se as principais informações relativas às vigas da série D. Os laminados de CFRP, que tinham uma secção transversal de $1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$ (a mesma dos laminados aplicados nas vigas das séries B e C), foram distribuídos de acordo com o critério definido na Figura 4.3 (linha AB). À semelhança do ocorrido nas vigas das séries A, B e C, e de acordo com o representado na Figura 4.65, o betão de recobrimento lateral dos estribos das vigas da presente série era de 22 mm.

4.5.2 - Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão das vigas, cuja composição se encontra registada no anexo B desta dissertação, foi efectuada experimentalmente à data da realização dos ensaios das vigas, a qual correspondeu uma idade média de 97 dias. Para tal, de acordo com a EN 206-1 (2000) efectuaram-se ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 3.5). Apesar de inicialmente se ter previsto um betão de classe de resistência similar ao das vigas da série B ($f_{cm} = 39.7 \text{ MPa}$), tal não se veio a concretizar, e o betão das vigas da série D tinha uma resistência mais elevada ($f_{cm} = 59.4 \text{ MPa}$). Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm (dois tipos de aço: cada viga continha um varão de aço $\phi 16$ do tipo 1 e um varão de aço $\phi 16$ do tipo 2) e de 32 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial (Figura 3.5) efectuados seguindo o estipulado na EN 10002-1 (1990). Os laminados utilizados nesta série foram retirados do mesmo rolo que os que foram utilizados nas vigas da série C, cuja caracterização experimental foi já apresentada na secção 4.4.2 do presente capítulo. Na Tabela 4.22 estão registados os valores médios das propriedades mecânicas mais significativas do betão, do aço e dos laminados de CFRP obtidos experimentalmente. Os valores registados em cada provete nos ensaios de caracterização dos referidos materiais estão compilados no anexo B. O adesivo utilizado para fixação dos laminados ao betão foi o mesmo que já tinha sido adoptado para os modelos das séries A, B e C.

Tabela 4.22 - Principais propriedades do betão, do aço e dos laminados de CFRP referentes à série D.

Betão	Resistência à compressão						
	$f_{cm} = 59.4 \text{ MPa}$ (aos 97 dias - idade à data do ensaio das vigas)						
	Resistência à tracção	$\phi 6$	$\phi 8$	$\phi 12$	$\phi 16$ (Tipo 1)	$\phi 16$ (Tipo 2)	$\phi 32$
Aço	f_{sym} (Tensão de cedência)	551 MPa	470 MPa	450 MPa	434 MPa	544 MPa	716 MPa
	f_{sum} (Tensão última)	602 MPa	611 MPa	579 MPa	572 MPa	658 MPa	908 MPa
Laminado de CFRP*	Resistência à tracção	Módulo de Elasticidade			Extensão máxima**		
	$f_{fum} = 2847.9 \text{ MPa}$ (Tensão última)	$E_{fm} = 174.3 \text{ GPa}$			$\varepsilon_{fum} = 16.3 \text{ ‰}$		

* Para as vigas da série D os laminados foram retirados do mesmo rolo que o utilizado para obter os reforços de CFRP aplicados nas vigas da série C.

** Valor obtido pela lei de Hooke.

4.5.3 - Sistema de ensaio e instrumentação dos modelos

No programa experimental associada à série de vigas D efectuaram-se dois tipos de ensaios de flexão sob três pontos. O primeiro (tipo I) correspondente ao carregamento de vigas, previamente à aplicação do reforço de CFRP, de modo a atingirem um determinado padrão de fendilhação (vigas 3S-5LI45F1-D, 3S-5LI45F2-D, 5S-5LI45F-D e 5S-5LI60F-D). No segundo (tipo II) solicitaram-se os modelos até à rotura (todos os modelos). O esquema de ambos os ensaios foi igual ao das vigas das séries anteriores (Figura 4.5) com a excepção da localização da carga que, na presente série, foi aplicada a meio do vão livre da viga (Figura 4.68).

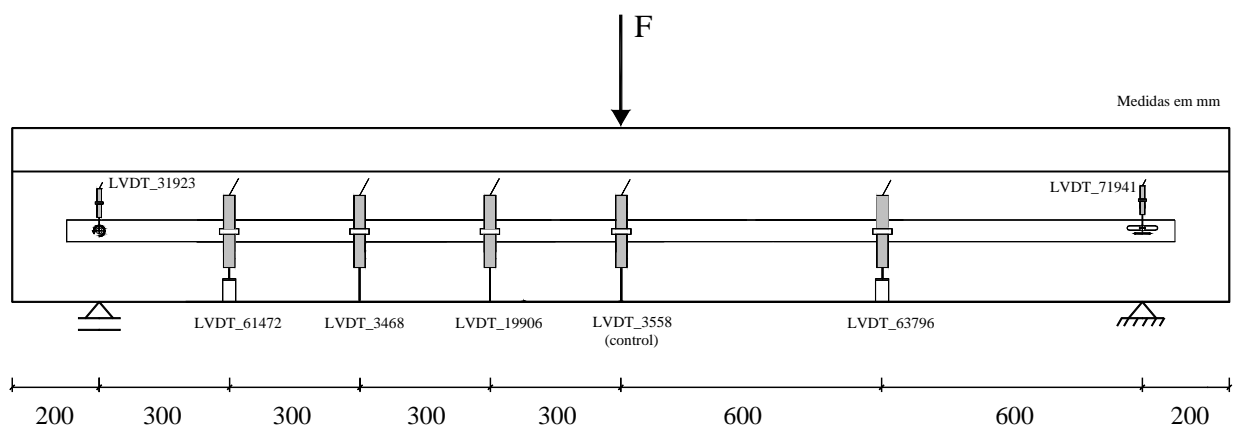


Figura 4.68 - Disposição dos transdutores de deslocamentos (LVDT's) nas vigas da série D.

Para instrumentação recorreu-se a uma célula de carga com capacidade máxima de carga de 1000 kN, para medir a força aplicada durante o ensaio, e a transdutores de deslocamentos (LVDT's) para medir os deslocamentos em determinadas secções da viga (secção de aplicação da carga; secções do vão de

corte a afastadas $0.25a$, $0.5a$ e $0.75a$ da secção de aplicação da carga; secção a meio do vão de corte b ; secção de cada apoio). Os LVDT's ficaram suportados num sistema que evita o registo de deslocamentos parasitas ("Japanese Yoke"), tal como representado na Figura 4.68. Os ensaios foram controlados por intermédio do LVDT colocado na secção de aplicação da carga (controlo), tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 0.01 mm/s (ensaios com controlo de deslocamentos), valor este igual ao adoptado nos ensaios das vigas das séries A, B e C.

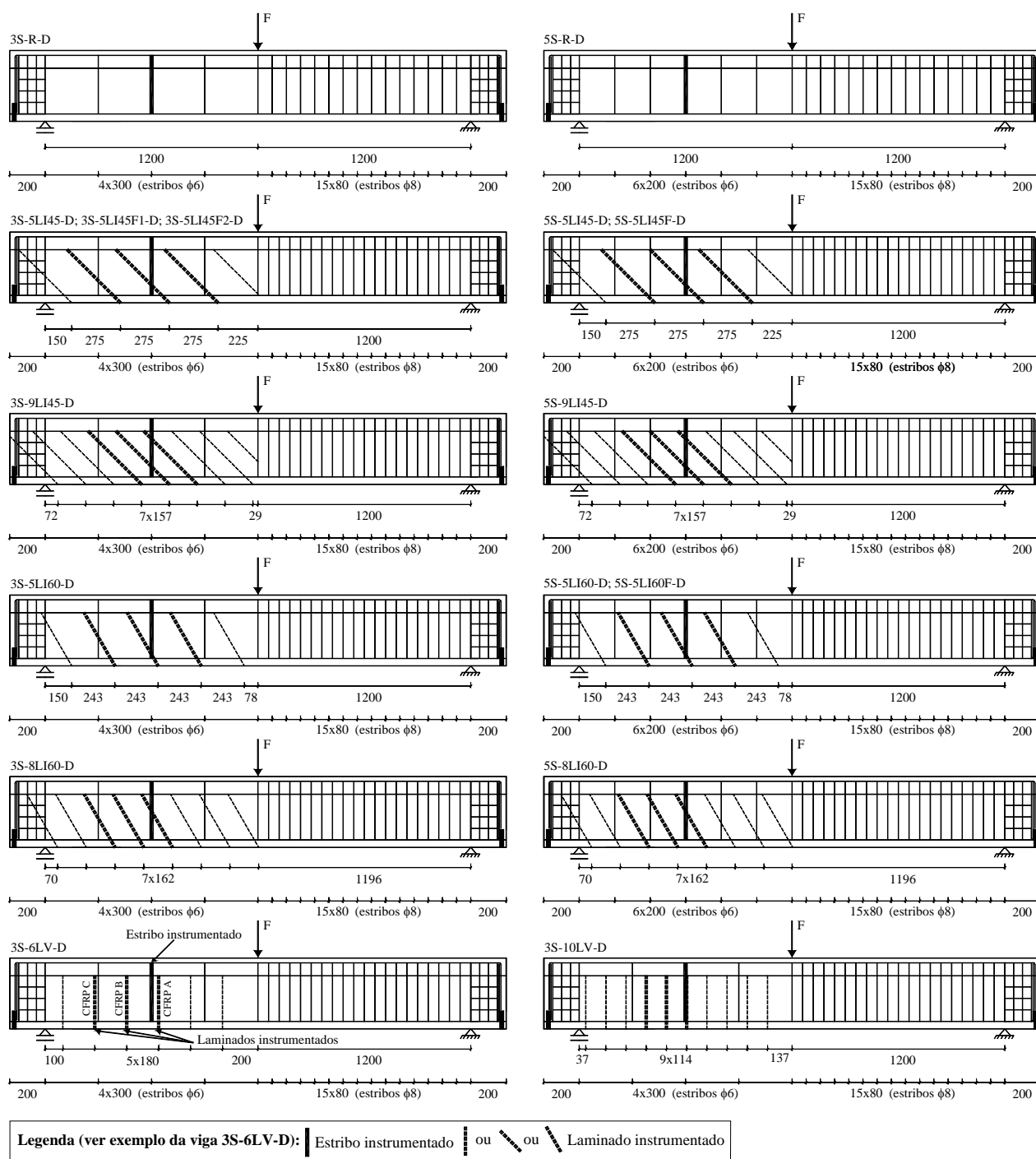


Figura 4.69 - Localização dos estribos e laminados instrumentados das vigas da série D.

No que diz respeito à estratégia de instrumentação dos laminados de CFRP foi adoptado um critério diferente do utilizado nas restantes séries de vigas. Esta alteração foi justificada pelo aumento do vão de corte onde o reforço de CFRP foi aplicado e que conduziu, tal como anteriormente foi referido, a um maior número de laminados por face do vão de corte a . Desta forma, em cada uma das vigas com CFRP foram instrumentados três laminados consecutivos (A, B e C). O laminado A era o que estava mais próximo da secção de aplicação da carga e o laminado B estava colocado entre os laminados A e C (ver exemplo da viga 3S-6LV-D na Figura 4.69). Para o caso das vigas sem pré-fendilhação do betão, e de acordo com a disposição da Figura 4.70, os CFRP extremos (A e C) continham três extensómetros (Ext.1, Ext.2 e Ext.3) e o CFRP B continha quatro extensómetros (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4). A minimização dos efeitos de perturbação, que a presença dos extensómetros poderia originar na ligação betão-adesivo-CFRP, foi tida em consideração ao ser adoptada uma distribuição alternada dos extensómetros em termos da face do laminado onde foram colados (no CFRP B os extensómetros Ext.1 e Ext.3 foram colados numa face e os extensómetros Ext.2 e Ext.4 foram colados na outra face; nos CFRP A e C os extensómetros Ext.1 e Ext.3 foram colados numa face e o extensómetro Ext. 2 foi colado na outra face). O número de extensómetros colados nos laminados instrumentados das vigas pré-fendilhadas será apresentado mais adiante. Para avaliar o comportamento da armadura transversal no decorrer do carregamento, o estribo de aço intermédio do vão de corte a foi instrumentado com três extensómetros eléctricos de acordo com a configuração representada na Figura 4.8. A localização do estribo e dos laminados instrumentados colocados em cada uma das vigas ensaiadas na série D está representada na Figura 4.69. A face da alma da viga onde foram instalados os laminados instrumentados e o ramo do estribo contendo dois extensómetros foi a oposta à representada na Figura 4.69.

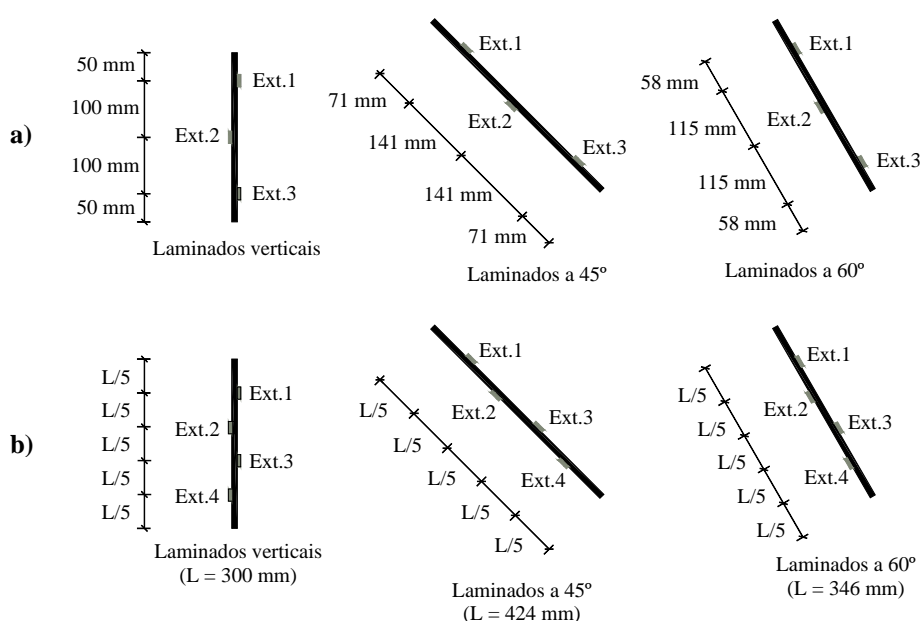


Figura 4.70 - Disposição dos extensómetros aplicados: a) CFRP A e C (Ext.1, Ext.2 e Ext.3) e b) CFRP B (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4).

4.5.4 Apresentação dos resultados dos ensaios de pré-fendilhação (ensaio tipo I)

As vigas 3S-5LI45F1-D, 3S-5LI45F2-D, 5S-5LI45F-D e 5S-5LI60F-D foram, previamente à aplicação do reforço de CFRP, solicitadas de tal forma a atingirem um determinado nível de fendilhação. Estabeleceu-se como critério de paragem do ensaio de pré-fendilhação das vigas (ensaio tipo I) o valor de 3 mm para o deslocamento na secção de aplicação da carga. O referido valor correspondia a uma flecha de $l/800$, em que l era o vão livre da viga ($l = 2.4$ m), ou seja, correspondia a 50% do valor máximo admissível para a flecha em termos de estado limite de deformação. Este critério foi previamente validado com os ensaios à rotura das vigas de referência 3S-R-D e 5S-R-D, de forma a verificar que conduziria à instalação de um padrão de fendilhação que contivesse fendas diagonais de corte na zona da viga que seria posteriormente reforçada com CFRP.

De forma a que fosse garantido o critério anteriormente mencionado, a força necessária a aplicar no ensaio de pré-fendilhação das vigas 3S-5LI45F1-D, 3S-5LI45F2-D, 5S-5LI45F-D e 5S-5LI60F-D foi, respectivamente, 239.9 kN, 232.6 kN, 245.4 kN e 253.4 kN. O nível de carregamento imposto aos quatro modelos pré-fendilhados provocou o padrão de fendilhação no vão de corte a representado na Figura 4.71, onde é possível constatar a existência de fendas diagonais de corte. A Figura 4.72 ilustra as curvas de comportamento carga total vs deslocamento central obtidas nas quatro vigas. Após a realização do ensaio de pré-fendilhação (ensaio tipo I) os modelos foram descarregados e procedeu-se à aplicação do reforço de CFRP. Posteriormente, cada uma das vigas foi carregada até esgotar a sua capacidade resistente (ensaio tipo II).

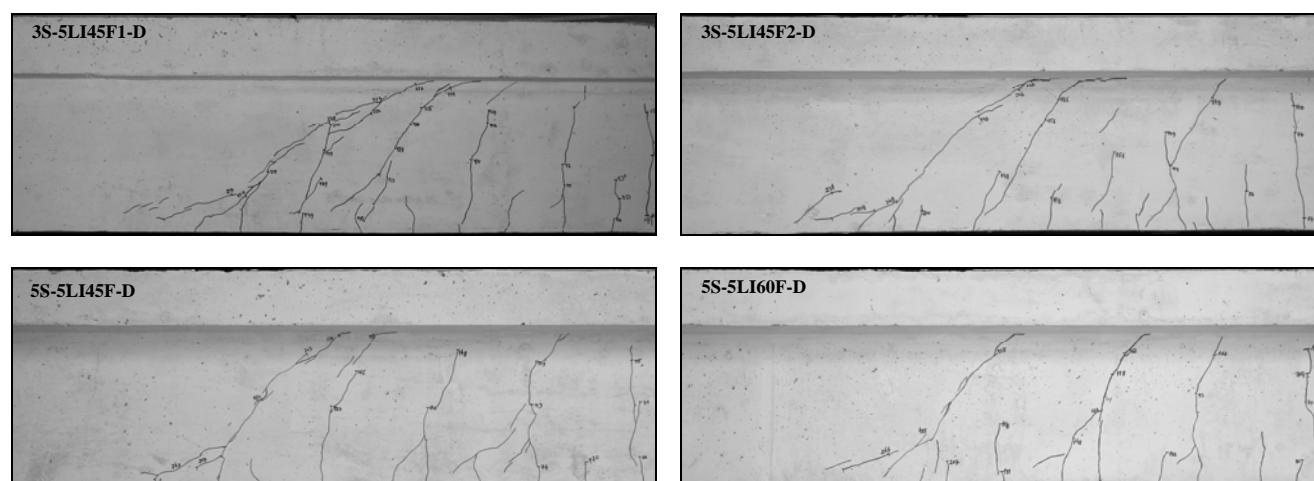


Figura 4.71 - Padrão de fendilhação instalado no vão de corte a após a realização do ensaio de pré-fendilhação (ensaio tipo I).

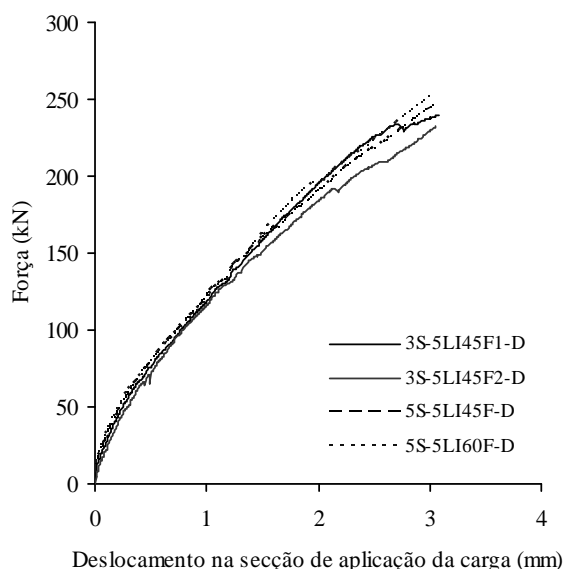


Figura 4.72 - Curvas carga total vs deslocamento central do ensaio de pré-fendilhação (tipo I).

A solução de reforço de CFRP aplicada nas vigas 3S-5LI45F1-D e 3S-5LI45F2-D foi a mesma que a executada na viga 3S-5LI45-D (sem pré-fendilhação do betão). Face ao padrão de fendilhação pré-instalado nas vigas 3S-5LI45F1-D e 3S-5LI45F2-D após o ensaio tipo I, a solução de reforço adoptada garantiu dois cenários diferentes em termos do grau de fixação do CFRP (comprimento de colagem) e do número de laminados que atravessavam as fendas de corte (Figura 4.73). Nas vigas 5S-5LI45F-D e 5S-5LI60F-D foram aplicadas, respectivamente, as soluções de reforço adoptadas nas vigas sem pré-fendilhação 5S-5LI45-D e 5S-5LI60-D. Desta forma, foram executadas duas distintas soluções de CFRP dimensionadas para proporcionarem acréscimos de carga máxima semelhantes e que, fundamentalmente, se diferenciavam na inclinação do CFRP (uma viga com laminados a 45° e uma viga com laminados a 60°). Na Figura 4.73 apresenta-se uma das faces do vão de corte *a* das quatro vigas pré-fendilhadas após a aplicação do reforço de CFRP.

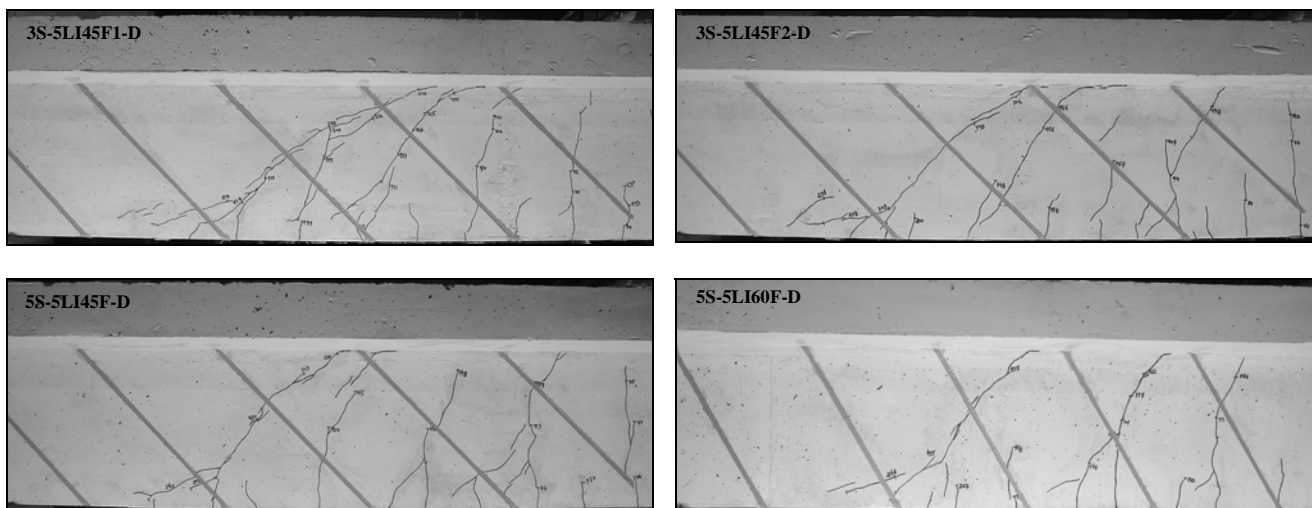


Figura 4.73 - Vigas pré-fendilhadas após a aplicação do reforço de CFRP.

O padrão de fendilhação pré-instalado nas vigas 3S-5LI45F1-D, 3S-5LI45F2-D, 5S-5LI45F-D e 5S-5LI60F-D e o posicionamento dos respectivos laminados (Figura 4.73) ditaram a instrumentação (número e localização de extensómetros) que seria adoptada para os reforços de CFRP. Na Figura 4.74 estão identificadas, com círculos, as secções dos três laminados instrumentados em que foram colados extensómetros eléctricos, destacando-se as secções atravessadas por fendas de corte (secções em que se registam os valores mais elevados da mobilização do reforço de CFRP). A localização de cada um dos extensómetros está registada na Tabela 4.23, em que cada medida apresentada diz respeito ao comprimento do laminado desde a sua extremidade superior (ligação alma-banzo da viga) até à secção de colagem do extensómetro. A designação adoptada para os laminados foi a mesma que a das vigas sem pré-fendilhação: CFRP A para o laminado mais próximo da secção de aplicação da carga, CFRP B para o laminado instrumentado intermédio e CFRP C para o laminado mais próximo do apoio (ver Figuras 4.69 e 4.74).

Tabela 4.23 - Localização das secções onde foram colados os extensómetros em cada um dos laminados instrumentados das vigas com CFRP pré-fendilhadas.

Viga	CFRP A			CFRP B				CFRP C	
	Ext. 1	Ext. 2	Ext. 3	Ext. 1	Ext. 2	Ext. 3	Ext. 4	Ext. 5	Ext. 1
3S-5LI45F1-D	5.3	14.5	-	8.7	17.5	25.4	31.9	38.3	36.5
3S-5LI45F2-D	6.9	20.1	-	7.4	14.8	23.4	31.9	37.2	33.8
5S-5LI45F-D	3.7	12.1	20.5	7.3	14.6	20.7	26.8	34.6	33.7
5S-5LI60F-D	8.8	17.6	26.1	7.0	14.0	20.8	27.5	-	28.6

Nota: a localização do posicionamento de cada extensómetro é fornecida por intermédio do comprimento (cm) do laminado, medido entre a sua extremidade superior (ligação alma-banzo da viga) e a secção onde o extensómetro foi colado. O critério de colagem dos extensómetros por laminado foi o mesmo que o adoptado nas vigas sem pré-fendilhação (ver Figura 4.70).

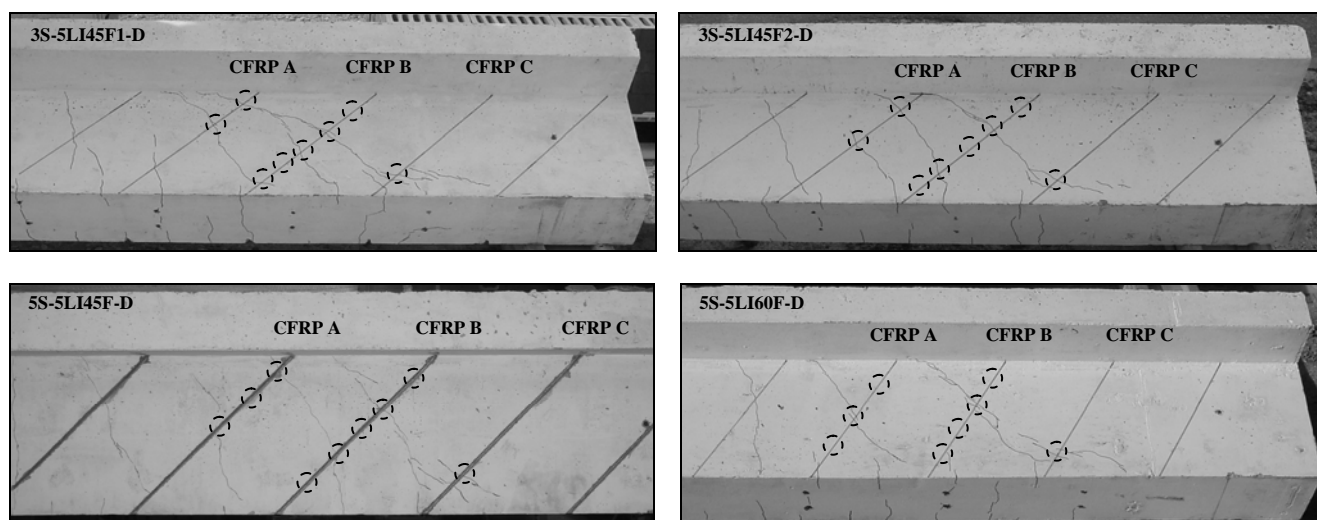


Figura 4.74 - Localização das secções dos laminados onde foram colados os extensómetros eléctricos nas vigas pré-fendilhadas.

4.5.5 - Apresentação e análise dos resultados dos ensaios à rotura das vigas

4.5.5.1 - Capacidade de carga das vigas sem pré-fendilhação

Na Tabela 4.24 apresenta-se, para as vigas da série D ensaiadas até à rotura sem pré-fendilhação do betão, o valor da força máxima (F_{max}) e da respectiva flecha na secção de aplicação da carga ($u_{F_{max}}$).

Atribuindo a designação F_{max}^{ref} à carga máxima registada nas vigas de referência de betão armado 3S-R-D (viga de referência das vigas 3S-6LV-D, 3S-10LV-D, 3S-5LI45-D, 3S-9LI45-D, 3S-5LI60-D e 3S-8LI60-D) e 5S-R-D (viga de referência das vigas 5S-5LI45-D, 5S-9LI45-D, 5S-5LI60-D e 5S-8LI60-D), determinaram-se os factores $\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ indicados na Tabela 4.24 ($\Delta F_{max} = F_{max} - F_{max}^{ref}$).

Neste grupo de vigas o valor do parâmetro $(\Delta F / F^{ref})_{max}$ coincide com o de $\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$, ou seja, o máximo acréscimo de carga proporcionado pelas várias soluções de reforço testadas foi alcançado para a situação de carga máxima das vigas com CFRP (a única excepção foi a viga 3S-6LV-D em que $(\Delta F / F^{ref})_{max} = 7.8\%$ para uma flecha central de 5.72 mm). As respostas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga e a relação $(\Delta F / F^{ref})_{max}$ vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com CFRP estão apresentadas nas Figuras 4.75 e 4.76. O primeiro tipo de resposta traduz o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente.

Uma análise geral aos dados da Tabela 4.24 e às Figuras 4.75 e 4.76 permite constatar que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado com uma relação a/d igual a 3.3, independentemente da percentagem de estribos de aço e da orientação e percentagem do CFRP, proporcionou aumentos consideráveis de rigidez, de deformação máxima na rotura e de capacidade máxima de carga. Tipicamente, o comportamento de uma viga reforçada ao corte com CFRP apresenta duas fases. A primeira em que o diagrama de comportamento da viga reforçada acompanha o da viga não reforçada até ao momento em que as fendas de corte se formam. A partir deste nível de carregamento (início da referida segunda fase), o reforço de CFRP oferece resistência ao desenvolvimento das fendas de corte, o que proporciona um aumento de rigidez relativamente ao que acontece na viga não reforçada. A segunda fase do comportamento de uma viga reforçada ao corte com CFRP culmina quando esta atinge a sua capacidade máxima resistente. Face ao exposto, e de acordo com o representado nas Figuras 4.75 e 4.76, nesta segunda fase do comportamento, para cada nível de deslocamento, as vigas reforçadas apresentam capacidade de carga superior à da viga sem CFRP. Além disso, o deslocamento associado à carga máxima das vigas reforçadas é superior ao da viga sem CFRP.

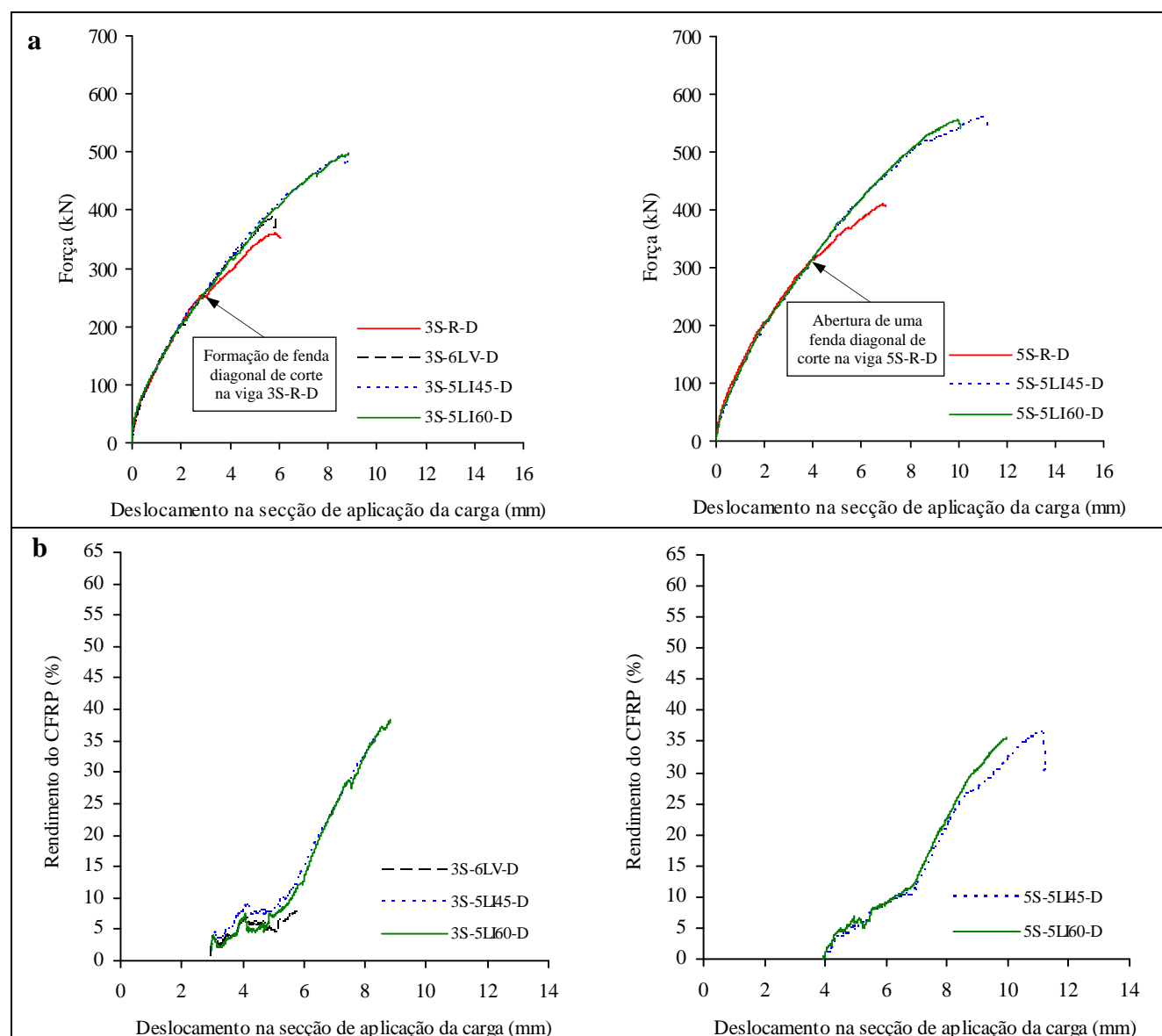


Figura 4.75 - Comportamento das vigas ensaiadas da série D com a menor percentagem de CFRP: a) capacidade de carga; b) rendimento do CFRP.

Nas Figuras 4.75 e 4.76 é visível que a presença do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal das vigas com três estribos de aço no vão de corte a tornou-se efectivo a partir de um deslocamento na secção de aplicação da carga de cerca de 2.96 mm. A carga correspondente a este deslocamento na viga 3S-R-D (253 kN) foi a que originou, nesta viga, o aparecimento de uma fenda diagonal de corte. O registo fotográfico desse instante está representado na Figura 4.77. Na curva de comportamento carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga, esta ocorrência é evidente na momentânea interrupção do aumento da capacidade de carga da viga 3S-R-D.

No que diz respeito às vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$ o efeito do reforço de CFRP, de acordo com o representado nas Figuras 4.75 e 4.76, foi notório a partir de um deslocamento na secção de aplicação da carga de cerca de 3.9 mm. A carga correspondente a este deslocamento na viga 5S-R-D (313 kN)

foi a que originou, nesta viga, uma abertura significativa das fendas diagonais de corte que entretanto se tinham formado e que, até ao referido instante, tinha sido controlada pela armadura transversal. O registo fotográfico desse instante está representado na Figura 4.77. Na curva de comportamento carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga, esta ocorrência é evidente na quebra de rigidez da viga 5S-R-D. Face ao exposto, e de acordo com o que já se referiu anteriormente, o CFRP ofereceu resistência efectiva à abertura das fendas de corte que os interceptaram, proporcionando um aumento de rigidez, conforme se pode verificar da análise das Figuras 4.75b) e 4.76b). O aumento de rigidez foi proporcional à percentagem de CFRP.

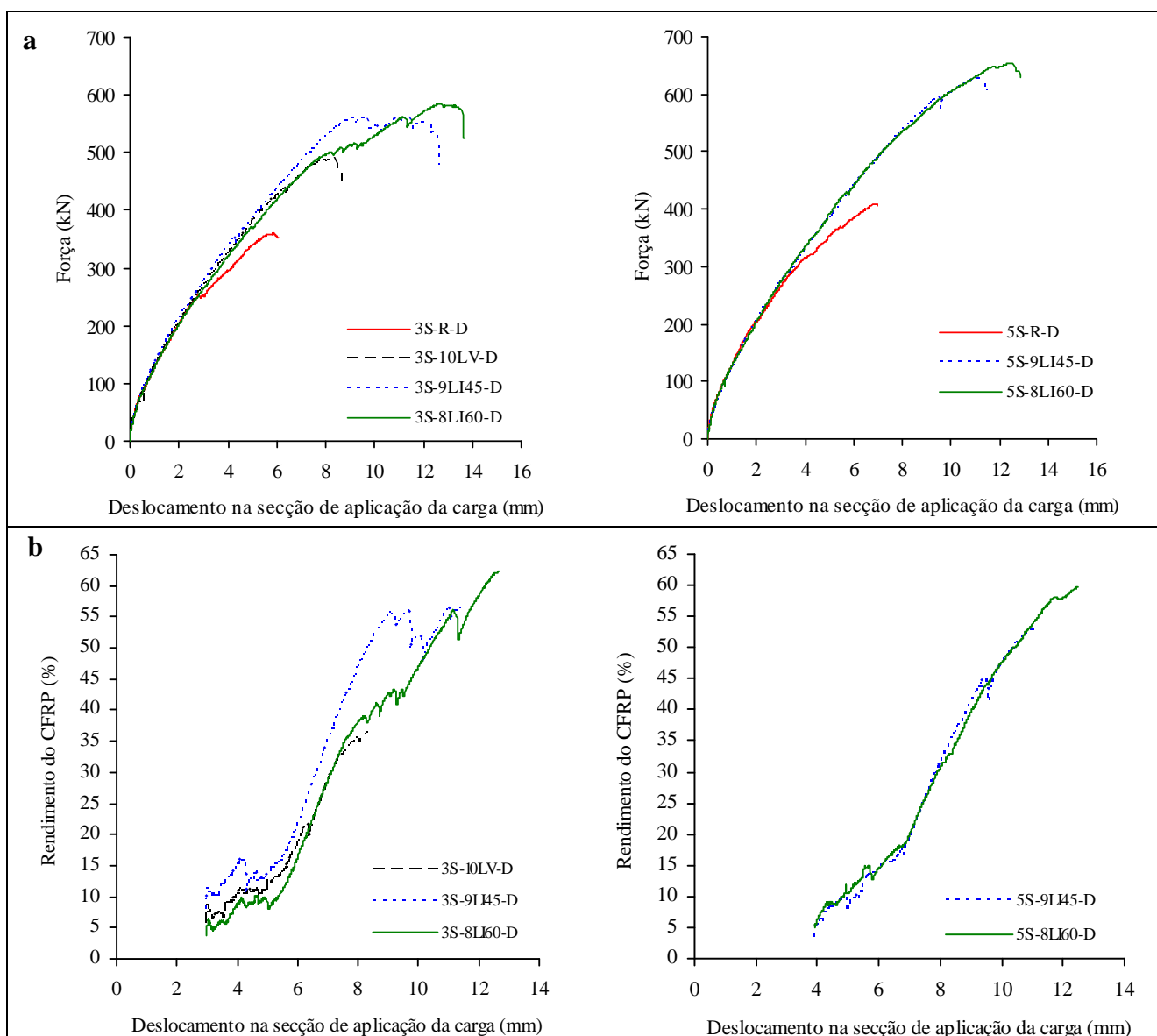


Figura 4.76 - Comportamento das vigas ensaiadas da série D com a maior percentagem de CFRP: a) capacidade de carga; b) rendimento do CFRP.

Tabela 4.24 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (vigas da série D).

Viga	ρ_{sw} [%]	ρ_f [%]	F_{max} [kN]	$\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ [%]	$u_{F_{max}}$ [mm]
C-R-D	-	-	255.8	-	2.98
3S-R-D	0.10	-	359.9	-	5.86
3S-6LV-D	0.10	0.08	387.0	7.5	5.78
3S-10LV-D	0.10	0.13	491.7	36.6	8.32
3S-5LI45-D	0.10	0.08	492.1	36.7	8.54
3S-9LI45-D	0.10	0.13	563.6	56.6	11.40
3S-5LI60-D	0.10	0.07	497.9	38.3	8.83
3S-8LI60-D	0.10	0.11	584.5	62.4	12.69
5S-R-D	0.16	-	409.7	-	6.86
5S-5LI45-D	0.16	0.08	559.5	36.6	11.09
5S-9LI45-D	0.16	0.13	627.5	53.2	11.18
5S-5LI60-D	0.16	0.07	556.4	35.8	9.98
5S-8LI60-D	0.16	0.11	654.6	59.8	12.47

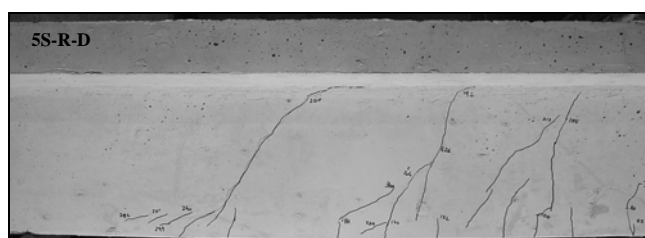
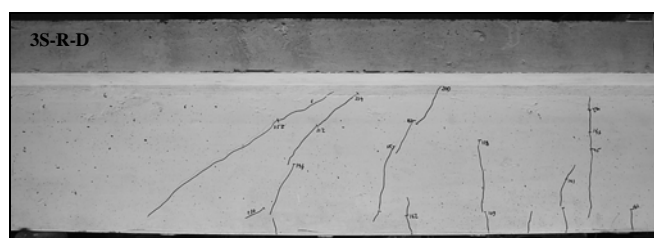


Figura 4.77 - Padrão de fendilhação associado a uma quebra de rigidez nas vigas 3S-R-D e 5S-R-D.

As soluções com a menor percentagem de laminados de CFRP (maior espaçamento entre os laminados consecutivos) foram as que conduziram a menores ganhos de capacidade de carga máxima, independentemente da percentagem de estribos. Assim, tomando em consideração o valor da carga máxima das vigas de referência (vigas 3S-R-D e 5S-R-D), as configurações de reforço referentes à menor percentagem de CFRP aplicada conduziram aos seguintes acréscimos da capacidade máxima de carga: 36.7% (laminados a 45°) e 38.3% (laminados a 60°) para as vigas com três estribos de aço no vão de corte a ; 36.6% (laminados a 45°) e 35.8% (laminados a 60°) para as vigas com cinco estribos de aço no vão de corte a . O aumento da percentagem de CFRP aplicada nas soluções de laminados a 45° e a 60°, conduziu a maiores aumentos da capacidade de carga máxima. De facto, para o caso das vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$, o reforço com laminados inclinados a 45° e inclinados a 60° garantiu, tomando como base de comparação a carga máxima da viga 3S-R-D, um aumento de 56.6% e 62.4%, respectivamente. Para o caso das vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$ os laminados

inclinados a 45° e inclinados a 60° garantiram, tomando como base de comparação a carga máxima da viga 5S-R-D, um aumento de 53.2% e 59.8%, respectivamente. O reforço com laminados verticais, apenas aplicado a vigas com três estribos de aço no vão de corte a , proporcionou um ganho de capacidade de carga máxima de 7.5% e 36.6%, respectivamente, para a menor e maior percentagem de CFRP aplicada.

Na Figura 4.78 apresenta-se, para cada solução de reforço de CFRP testada, o acréscimo de carga máxima obtido na viga com três estribos de aço no vão de corte a (coluna da esquerda) e o referido acréscimo quando o reforço foi aplicado numa viga com cinco estribos de aço no vão de corte a (coluna da direita). Os valores apresentados revelam que, ao contrário do ocorrido nas séries de vigas B e C, a percentagem de armadura transversal não teve influência preponderante nos ganhos de resistência proporcionados pelos reforços de CFRP. Com efeito os valores de $\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ para o caso das vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ apenas foram ligeiramente superiores. Em média, o ganho de resistência proporcionado pelas soluções de reforço aplicadas nas vigas com vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$ foi 96% do ganho de resistência proporcionado pelas mesmas soluções de reforço mas aplicadas a vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$. O valor desta relação para o caso das vigas testadas na série B e C foi de 70% e 55%, respectivamente. Os valores verificados nas séries de vigas B, C e D permitem constatar que a influência da armadura transversal diminui com o aumento da qualidade do betão.

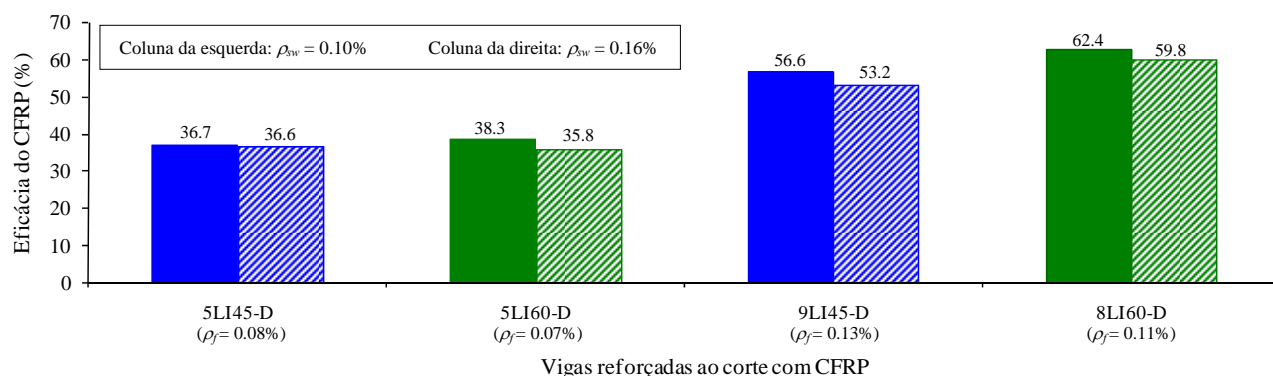


Figura 4.78 - Efeito da percentagem de estribos de aço (vigas da série D).

Conforme se pode constatar ao analisar as Figuras 4.75b) e 4.76b), não existiram diferenças significativas em termos de rigidez com a variação da percentagem de armadura transversal. Se em termos de acréscimo de rigidez e de capacidade de carga máxima, o aumento da percentagem de estribos de aço não proporcionou diferenças significativas, tal não se verificou em termos de deformação associada à carga máxima registada nas vigas. Com efeito, as soluções de laminados inclinados aplicadas a vigas com ρ_{sw} igual a 0.10% proporcionaram um valor médio de $u_{F_{max}}$ 76.9% superior ao valor de $u_{F_{max}}$ da viga 3S-R-D. As mesmas soluções de reforço aplicadas em vigas com

ρ_{sw} igual a 0.16% proporcionaram um valor médio de u_{Fmax} 63% superior ao valor de u_{Fmax} da viga 5S-R-D.

Os resultados obtidos nas vigas reforçadas com CFRP sem pré-fendilhação do betão permitem concluir que, independentemente da percentagem de estribos de aço, as soluções com laminados inclinados tiveram melhor desempenho que as soluções de laminados colocados perpendicularmente ao eixo da viga. De um modo geral, as soluções com laminados a 60° foram as mais eficazes em termos de capacidade de carga máxima e de deformação na rotura, especialmente, para a maior gama de percentagem de CFRP testada. Na descrição dos modos de rotura serão apontadas as causas do desempenho das várias configurações testadas de reforço ao corte com CFRP.

4.5.5.2 - Modos de rotura das vigas sem pré-fendilhação

Como era esperado, a rotura por corte acabou por se registar em todas as vigas ensaiadas, tendo ocorrido no vão de corte a . Na Figura 4.79 apresentam-se pormenores da zona de rotura das vigas da série D sem pré-fendilhação, onde as linhas verticais correspondem à localização dos estribos de aço e os círculos à posição das secções onde ocorreu a rotura dos estribos durante o ensaio.

A viga C-R-D atingiu a sua capacidade máxima com a abertura excessiva da fenda diagonal de corte que se formou ao longo do ensaio. Nas vigas 3S-R-D e 5S-R-D a capacidade máxima de carga foi atingida quando ocorreu a rotura de um dos estribos que atravessavam a fenda de rotura de corte. A rotura dos restantes estribos deu-se após as vigas terem atingido a sua carga máxima.

Nas vigas reforçadas com a menor percentagem de CFRP registaram-se, essencialmente, dois modos de rotura. O primeiro, que ocorreu nas vigas 3S-6LV-D, 3S-5LI45-D, 5S-5LI45-D e 5S-5LI60-D, foi o deslizamento do CFRP atravessado pela fenda de rotura de corte. Na viga 3S-5LI60-D ocorreu a rotura do laminado central. Os modos de rotura que se acabam de referir diferiram, de uma maneira geral, dos que foram observados nas vigas das séries anteriores, onde os laminados que cederam continham um volume de betão adjacente. Com efeito, o facto das vigas da série D conterem um betão de melhor qualidade proporcionou a ocorrência de modos de rotura que garantiram um melhor aproveitamento do reforço de CFRP e, conseqüentemente, originaram elevados incrementos de capacidade de carga e de deformação das vigas reforçadas. Em termos do padrão de fendilhação nas vigas com a menor percentagem de CFRP ocorreram, tipicamente, três fendas de corte, apresentando a que surgiu mais próximo do apoio uma menor inclinação. Esta diferença de inclinações pode originar diferenças no número de elementos resistentes ao esforço transversal, o que tem consequência ao nível do comportamento estrutural das vigas reforçadas.

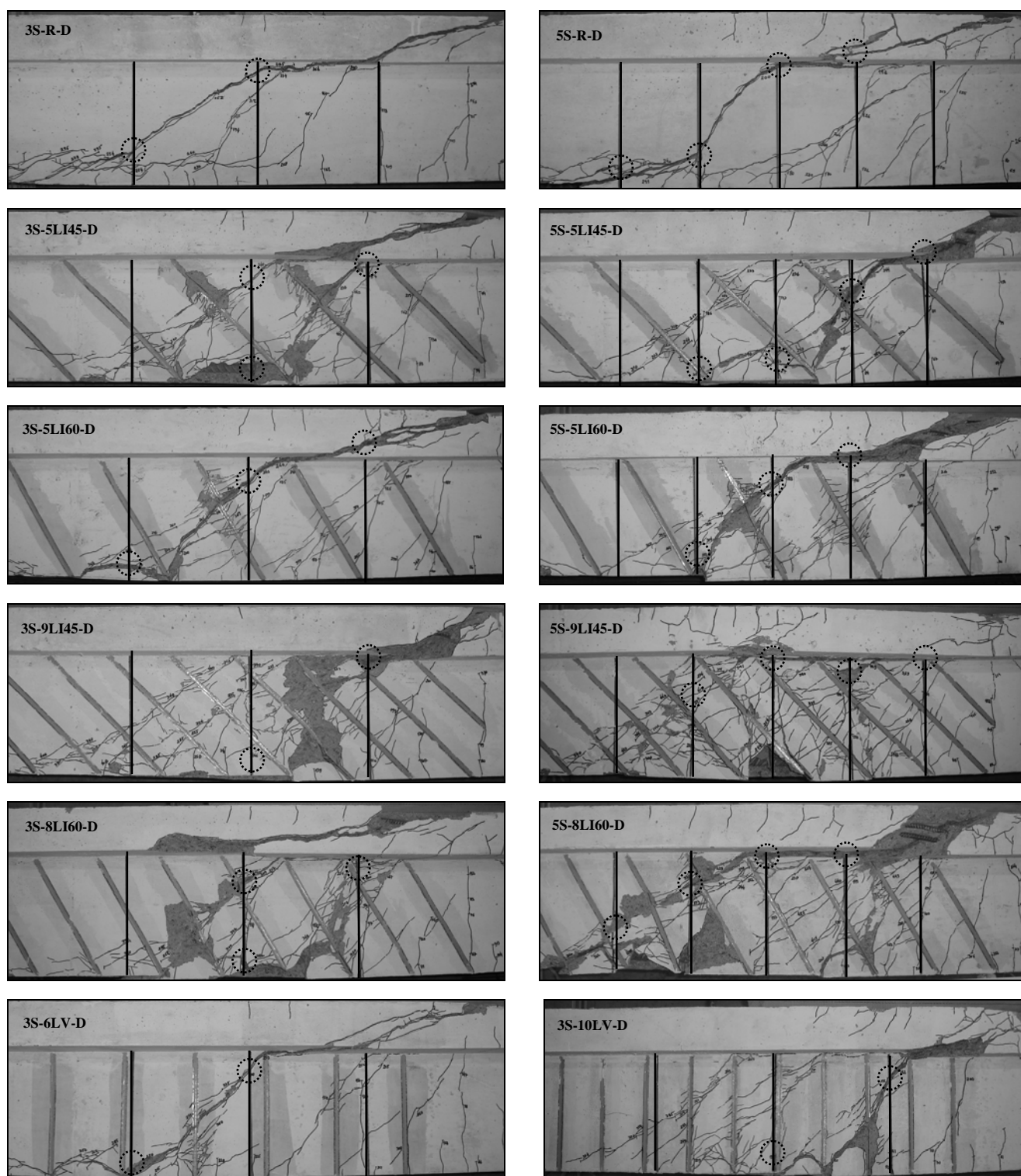


Figura 4.79 - Modos de rotura das vigas da série D sem pré-fendilhação.

Na Figura 4.80 apresenta-se a sequência do ensaio da viga 3S-6LV-D. A carga máxima desta viga ocorreu com o deslizamento da parte inferior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga (ver pormenor da Figura 4.83) e que atravessava uma das fendas de corte que se formaram durante o carregamento. A não ortogonalidade das fendas de corte em relação à orientação das fibras dos laminados dispostos verticalmente, associada à distribuição pouco homogénea do CFRP e dos

estribos de aço fizeram com que o desempenho da solução de reforço da viga 3S-6LV-D fosse o mais baixo de todas as vigas reforçadas na série D. Um outro factor justificativo desta ocorrência (valor de $\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ ser apenas de 7.5%), e que será objecto de análise no Capítulo 5, está relacionado com o facto da fenda de rotura de corte na alma da viga ser apenas atravessada por um estribo, enquanto que na viga sem CFRP a referida fenda foi atravessada por dois estribos (Figura 4.79).

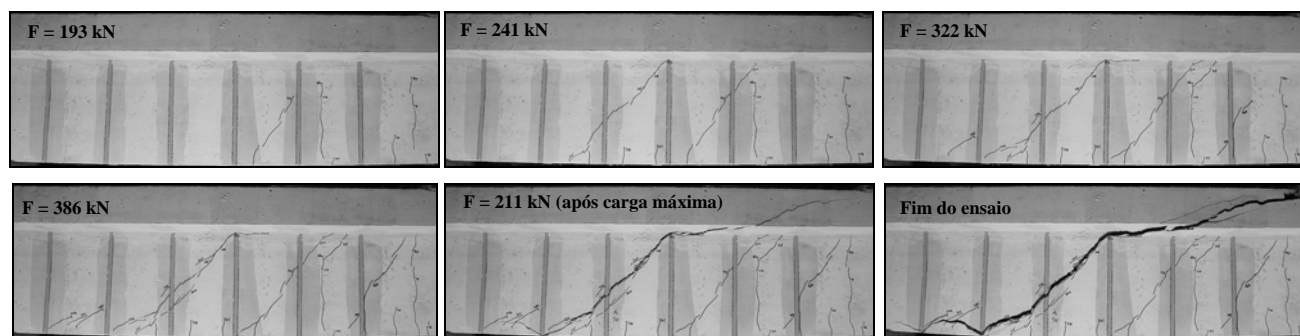


Figura 4.80 - Fases do ensaio da viga 3S-6LV-D (carga máxima = 387.0 kN).

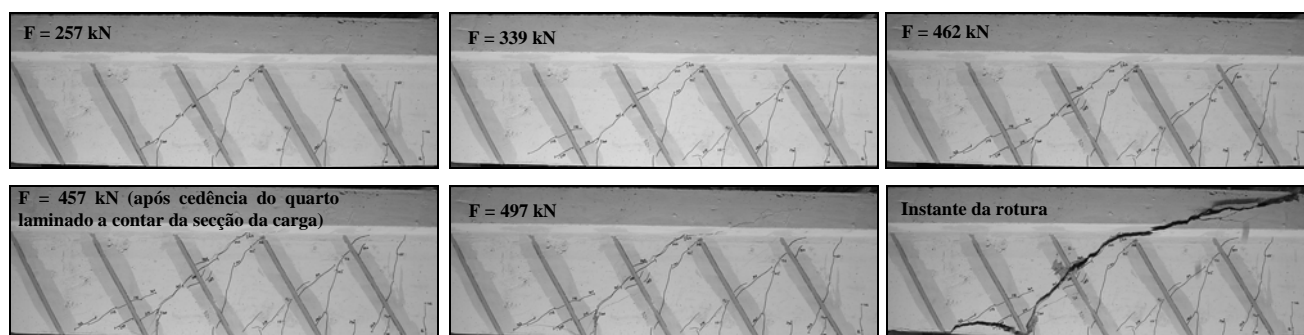


Figura 4.81 - Fases do ensaio da viga 3S-5LI60-D (carga máxima de 497.9 kN).

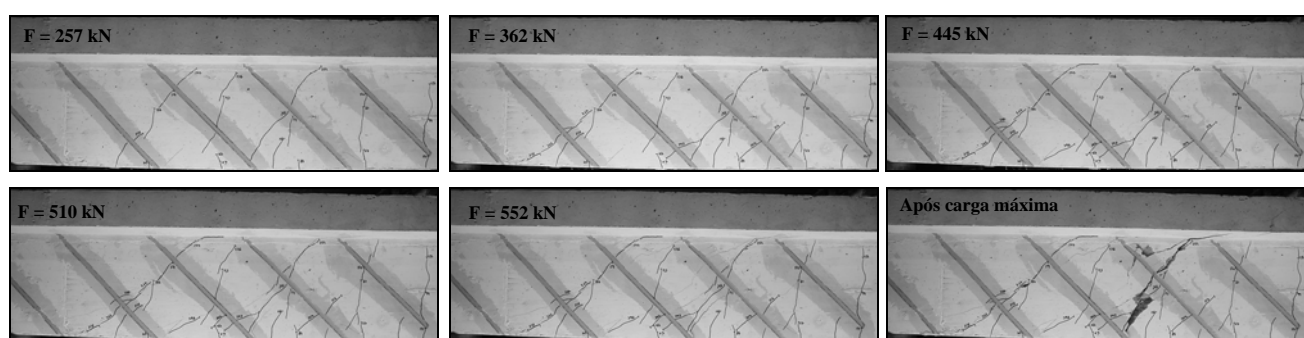


Figura 4.82 - Fases do ensaio da viga 5S-5LI45-D (carga máxima de 559.5 kN).

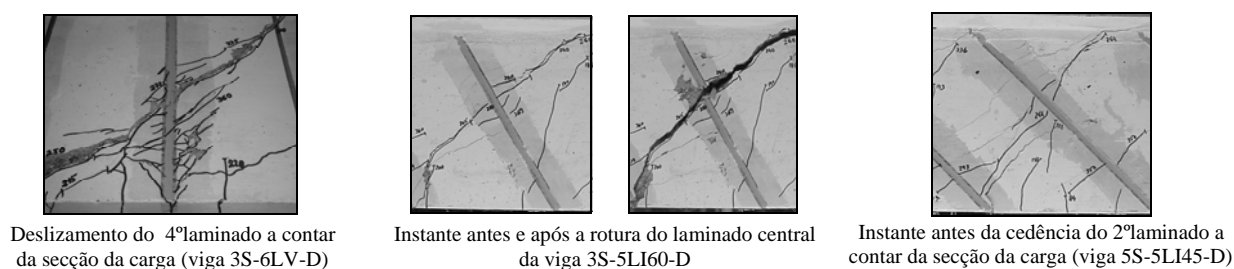


Figura 4.83 - Alguns pormenores das vigas da série D.

A viga 3S-5LI45-D atingiu a sua capacidade de carga máxima imediatamente antes de ocorrer o deslizamento da parte inferior do laminado central. De acordo com a sequência do ensaio da viga 3S-5LI60-D representada na Figura 4.81, e como já anteriormente foi referido, a carga máxima (497.9 kN) deu-se previamente à rotura do laminado central que atravessava a fenda de rotura de corte (ver pormenor da Figura 4.83). Nesta viga, aos 462 kN, ocorreu a cedência da parte inferior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga e que motivou uma ligeira diminuição da capacidade de carga da viga. As vigas 5S-5LI45-D e 5S-5LI60-D atingiram a sua capacidade máxima resistente imediatamente antes de ocorrer, respectivamente, o deslizamento do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga (Figura 4.83) e o deslizamento do laminado central. A sequência do ensaio das restantes vigas com a menor percentagem de CFRP (3S-5LI45-D e 5S-5LI60-D) está registada no anexo D.

A carga máxima da viga 3S-10LV-D ocorreu com o deslizamento da parte inferior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga. A viga 3S-9LI45-D teve a sua primeira quebra de capacidade de carga acentuada cerca dos 560 kN quando ocorreu o deslizamento do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga (Figura 4.84). Posteriormente, resultante de uma redistribuição de esforços pelos vários elementos resistentes ao esforço transversal, a carga voltou a aumentar até ao seu valor máximo (563.6 kN) que aconteceu imediatamente antes de se dar o destacamento da parte superior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga. A rotura da viga 5S-9LI45-D (Figura 4.85) esteve associada ao destacamento da parte superior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga seguindo-se, de imediato, o deslizamento da parte inferior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga. Na viga 3S-8LI60-D cerca dos 514 kN ocorreu o escorregamento do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga. Posteriormente ocorreu uma redistribuição de esforços pelos vários elementos resistentes à abertura e propagação da fenda de rotura de corte, que proporcionou que a viga atingisse a sua capacidade de carga máxima para um valor de 584.5 kN. A carga máxima da viga 5S-8LI60-D ocorreu imediatamente antes de ocorrer o deslizamento do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga (Figura 4.86).

O padrão de fendilhação instalado nas vigas com a maior percentagem de CFRP foi mais difuso que o das vigas com menor percentagem de reforço. Um outro aspecto que o padrão de fendilhação registado nas vigas com CFRP permite constatar é que, de um modo geral, surgiram dois tipos de fendas de corte: um tipo de fenda que se forma mais próximo da secção de aplicação da carga e outro que se forma mais próximo do apoio. Esta última tem tendência a ter valores de inclinação inferiores ao do primeiro tipo de fenda que se referiu anteriormente, ou seja, tem probabilidade de ser atravessada por um maior número de elementos resistentes ao corte. Desta forma se justifica que em

algumas vigas a rotura tenha ocorrido associada à fenda de corte que se formou mais perto da secção da carga.

Um último comentário relativo aos modos de rotura diz respeito às vigas com maior percentagem de CFRP (a sequência do ensaio das vigas não apresentadas neste capítulo podem ser consultadas no anexo C desta dissertação), nomeadamente, com o facto do modo de rotura associado ao destacamento de uma parede de betão mais CFRP, que foi observado em vigas de séries anteriores, apenas ter sido visível na viga 5S-9LI45-D (Figura 4.85). Com efeito, após as primeiras cedências CFRP verificou-se a formação e destacamento progressivo de uma parede de betão mais CFRP. Em face do ocorrido nas vigas de maior percentagem de CFRP testada na série D, verifica-se que para betões de resistência elevada o referido modo de rotura é retardado.

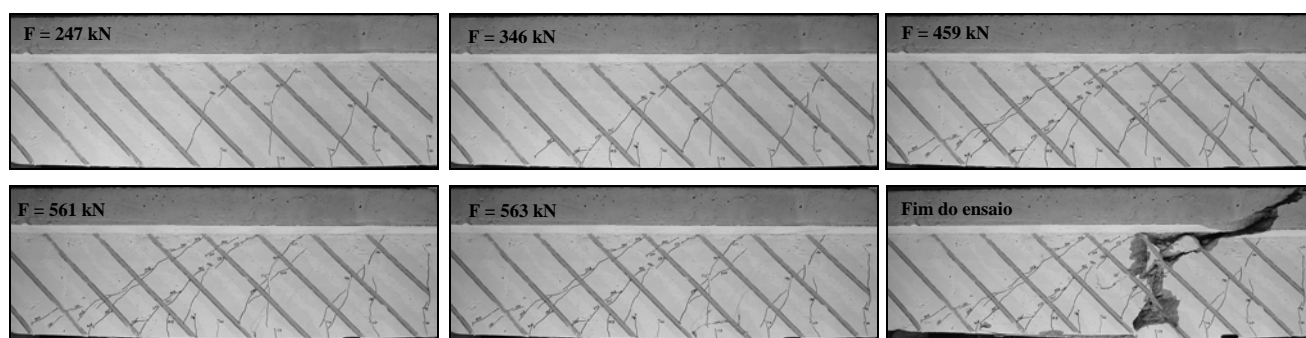


Figura 4.84 - Fases do ensaio da viga 3S-9LI45-D (carga máxima de 563.6 kN).

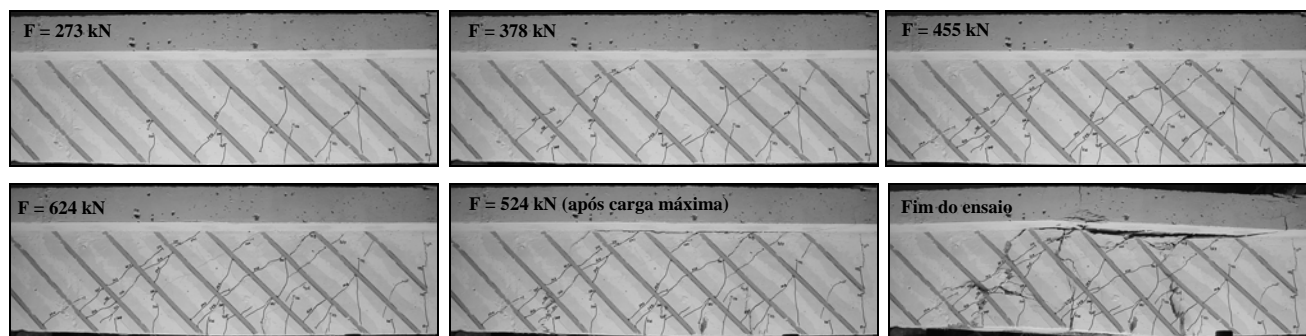


Figura 4.85 - Fases do ensaio da viga 5S-9LI45-D (carga máxima de 627.5 kN).

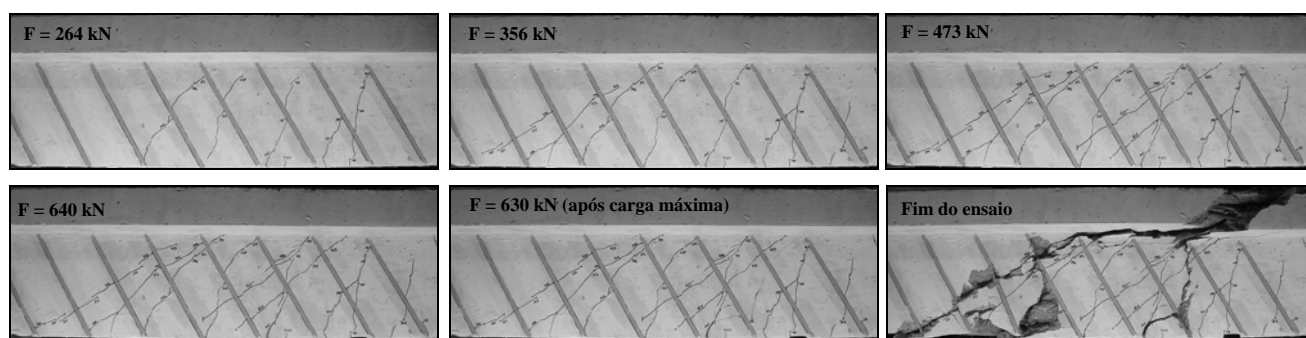


Figura 4.86 - Fases do ensaio da viga 5S-8LI60-D (carga máxima de 654.6 kN).

4.5.5.3 - Extensão no CFRP e nas armaduras transversais das vigas sem pré-fendilhação

Na Tabela 4.25 apresentam-se, para cada viga reforçada sem pré-fendilhação, os valores das extensões registadas nos extensómetros colados em cada um dos CFRP instrumentados (Figuras 4.69 e 4.70) correspondentes à carga máxima (F_{max}). Para o caso em que a extensão máxima nos CFRP ocorreu para uma carga inferior a F_{max} , os valores registados nos extensómetros nesse instante encontram-se entre parêntesis curvos. Além do que foi referido, na Tabela 4.25 apresenta-se, para cada viga reforçada, o valor da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados antes das vigas atingirem a rotura (ε_{CFRP}^{max}), bem como, o valor médio das extensões máximas registadas nos três CFRP instrumentados (ε_{CFRP}^{max})_m.

Da análise dos dados da Tabela 4.25 é possível verificar que o valor máximo das extensões registadas nas vigas reforçadas com CFRP variou entre os 8.2‰ na viga 3S-6LV-D e os 15.0‰ na viga 3S-5LI60-D. Este último valor corresponde a 92% da extensão de rotura do CFRP obtida nos ensaios de tracção uniaxial (Tabela 4.22). Em termos da extensão (ε_{CFRP}^{max})_m, a variação foi entre os 3.9‰ na viga 3S-6LV-D e os 9.9‰ na viga 5S-5LI45-D. A média dos valores máximos de ε_{CFRP}^{max} e dos valores de (ε_{CFRP}^{max})_m para as vigas com CFRP ensaiadas na presente série foi de 10.7‰ e 8.0‰, respectivamente. Esta gama de valores foi claramente superior ao registado nas vigas das séries anteriores, estando este facto directamente associado à qualidade do betão da série D, a qual era claramente superior à das restantes séries.

Nas vigas com a maior percentagem de CFRP, com a excepção do caso da solução com laminados verticais, os valores máximos de ε_{CFRP}^{max} foram mais baixos que os verificadas nas vigas com a menor percentagem de CFRP. O padrão de fendilhação mais discreto e o menor número laminados originaram, necessariamente, uma concentração de extensões em determinadas secções do laminado.

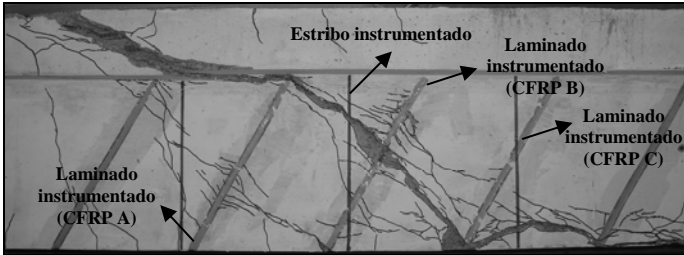
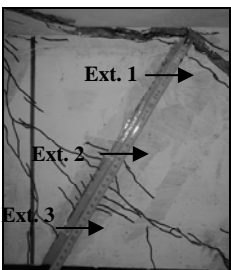
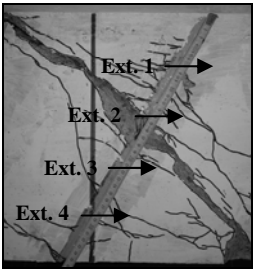
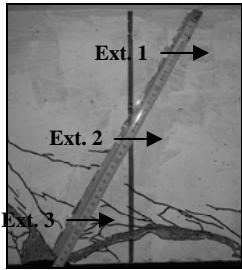
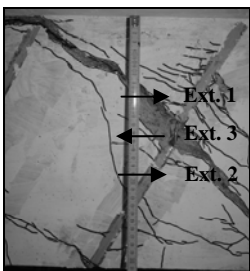
Em termos de orientação do CFRP, a solução com laminados inclinados a 60° foi a que mais mobilizou a capacidade resistente do material de reforço. Com efeito, considerando a máxima extensão ε_{CFRP}^{max} por viga para as quatro soluções de laminados a 60° verifica-se que o seu valor médio foi de 11.7‰, ou seja, 72% da extensão máxima obtida nos ensaios de tracção directa dos laminados (16.3‰ - Tabela 4.22). As soluções de laminados verticais e de laminados inclinados a 45° conduziram, em termos médios, a uma mobilização do reforço de cerca de 51% (extensão de 8.4‰) e 67% (extensão de 10.9‰), respectivamente.

Tabela 4.25 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP nas vigas da série D (sem pré-fendilhação).

Viga	CFRP	$\varepsilon_{Ext.1}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.2}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.3}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.4}$ [‰]	ε_{CFRP}^{max} [‰]	$(\varepsilon_{CFRP}^{max})_m$ [‰]
3S-6LV-D	A	0.17	0.26	1.22	-	1.2	3.9
	B*	0.16 (0.17)	3.52 (3.60)	7.51 (8.19)	6.41 (5.75)	8.2	
	C	0.04	0.34	2.24	-	2.2	
3S-5LI45-D	A	6.07	6.53	3.34	-	6.5	8.4
	B	4.93	12.03	7.15	6.58	12.0	
	C	0.09	0.32	6.68	-	6.7	
3S-5LI60-D	A	0.29	7.71	2.96	-	7.7	9.6
	B	12.12	15.02	11.89	4.06	15.0	
	C*	0.19 (0.16)	1.26 (1.45)	3.61 (6.24)	-	6.2	
3S-10LV-D	A	5.44	2.84	1.45	-	5.4	6.8
	B*	6.51 (6.64)	5.83 (6.02)	5.78 (5.93)	1.96 (1.51)	6.6	
	C	0.31	8.47	6.00	-	8.5	
3S-9LI45-D	A*	4.02 (4.31)	6.56 (8.50)	-	-	8.5	9.5
	B	10.36	9.07	5.05	3.66	10.4	
	C*	0.36 (0.36)	8.78 (9.70)	3.96 (3.92)	-	9.7	
3S-8LI60-D	A*	8.79 (8.88)	4.99 (4.97)	3.93 (3.91)	-	8.9	7.3
	B*	0.43 (0.31)	3.33 (3.69)	8.63 (8.95)	5.47 (4.14)	9.0	
	C	0.30	0.69	4.09	-	4.1	
5S-5LI45-D	A	10.35	12.79	5.17	-	12.8	9.9
	B	11.17	6.50	2.35	4.39	11.2	
	C*	0.17 (0.18)	5.04 (5.61)	4.37 (3.27)	-	5.6	
5S-5LI60-D	A	2.10	9.56	3.81	-	9.6	9.1
	B*	11.12 (9.86)	12.74 (14.05)	11.42 (10.57)	7.43 (5.52)	14.1	
	C*	0.23 (0.16)	0.66 (0.59)	2.57 (3.70)	-	3.7	
5S-9LI45-D	A*	8.15 (8.21)	8.14 (8.27)	6.78 (5.76)	-	8.3	7.5
	B*	5.44 (5.58)	8.08 (8.20)	7.90 (8.40)	7.65 (7.94)	8.4	
	C*	0.73 (0.70)	5.82 (5.85)	3.68 (3.71)	-	5.9	
5S-8LI60-D	A*	1.80 (1.70)	7.18 (8.33)	3.81 (2.70)	-	8.3	8.2
	B	8.75	8.72	2.87	3.26	8.8	
	C	0.27	7.41	4.19	-	7.4	

* Os valores das extensões entre parênteses referem-se à carga para a qual ocorreu a máxima extensão no CFRP instrumentado antes da carga máxima (385.9 kN no CFRP B da viga 3S-6LV-D, 433.6 kN no CFRP C da viga 3S-5LI60-D, 485.6 kN no CFRP B da viga 3S-10LV-D, 560.1 kN no CFRP A da viga 3S-9LI45-D, 560.5 kN no CFRP C da viga 3S-9LI45-D, 584.3 kN no CFRP A da viga 3S-8LI60-D, 486.4 kN no CFRP B da viga 3S-8LI60-D, 520.4 kN no CFRP C da viga 5S-5LI45-D, 538.1 kN no CFRP B da viga 5S-5LI60-D, 441.5 kN no CFRP C da viga 5S-5LI60-D, 626.9 kN no CFRP A da viga 5S-9LI45-D, 624.9 kN no CFRP B da viga 5S-9LI45-D, 625.8 kN no CFRP C da viga 5S-9LI45-D, 627.9 kN no CFRP A da viga 5S-8LI60-D).

Tabela 4.26 - Variação das extensões no laminado e estribo instrumentados da viga 3S-5LI60-D (valores das extensões em %).

Descrição								
Reforço ao corte com CFRP constituído por cinco laminados inclinados a 60° em cada face da viga. A carga máxima atingida foi de $F_{max} = 497.9$ kN imediatamente antes rotura do laminado central.								
CFRP A		Ext.	F = 150 kN	F = 250 kN	F = 350 kN	F = 400 kN	F = 450 kN	F = 497.9 kN
		1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
		2	0.1	0.2	2.5	3.9	5.5	7.7
		3	0.2	0.7	1.1	1.3	1.7	3.0
CFRP B		Ext.	F = 150 kN	F = 250 kN	F = 350 kN	F = 400 kN	F = 450 kN	F = 497.9 kN
		1	0.0	0.2	0.8	3.0	7.1	12.1
		2	0.0	3.5	7.7	9.2	10.6	15.0
		3	0.1	0.5	1.8	3.0	7.1	11.9
		4	0.4	1.0	1.2	1.5	2.1	4.1
CFRP C		Ext.	F = 150 kN	F = 250 kN	F = 350 kN	F = 400 kN	F = 450 kN	F = 497.9 kN
		1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
		2	0.1	0.2	0.4	0.7	1.4	1.3
		3	0.1	1.7	4.5	5.6	5.5	3.6
Estribo de aço		Ext.	F = 150 kN	F = 250 kN	F = 350 kN	F = 400 kN	F = 450 kN	F = 497.9 kN
		1 ^a	0.0 (0.0)	1.0 (0.7)	4.0 (2.4)	4.5	5.1	8.9
		2	0.2 (0.1)	0.7 (0.5)	1.1 (0.5)	1.0	1.6	2.6
		3	0.0	0.1	0.4	1.2	1.5	1.9

Nota: Na identificação da localização dos extensómetros colados no estribo a seta que aponta para a esquerda indica que o extensómetro está do lado oposto ao representado na fotografia. ^a Valores entre parêntesis referem-se à viga 3S-R-D cujo valor de F_{max} foi igual a 359.9 kN.

Por forma a ilustrar a variação das extensões registadas nos laminados e no estribo de aço que continham extensómetros eléctricos, durante o processo de carregamento de uma viga até ao instante em que atingiu a sua capacidade de carga máxima, na Tabela 4.26 apresentam-se valores das referidas extensões para diferentes níveis de carga da viga 3S-5LI60-D. O valor máximo da extensão registada

no laminado instrumentado foi de 15.0‰ e ocorreu no Ext.2 colado no CFRP B. Este extensómetro foi o que assinalou os maiores valores da extensão, dado ter ficado localizado na proximidade da fenda de rotura de corte. Os extensómetros Ext.1 e Ext.3 do CFRP B, simetricamente colados em relação à secção do Ext.2, registaram também valores praticamente semelhantes: 12.1‰ e 11.9‰, respectivamente. A extensão para a carga máxima da viga registada em Ext.4, localizado a uma distância da secção de Ext.2 igual ao dobro do Ext.3, foi de 4.1‰. Assim, verificou-se uma distribuição não linear das extensões no CFRP atravessado pela fenda de rotura de corte: os valores mais elevados foram registados na proximidade da fenda e foram diminuindo à medida que os extensómetros se encontram mais afastados da secção da referida fenda. A fenda de corte que provocou as extensões anteriormente referidas atravessou, não só, o CFRP B como, também, o CFRP C, nomeadamente nas proximidades do Ext.3. O valor máximo da extensão registado neste extensómetro não ocorreu para a carga máxima da viga. A zona do Ext.2 foi pouco solicitada enquanto que no Ext.1, por não existirem fendas na proximidade, não houve registos de variações de extensões. O mesmo se passou no Ext.1 do CFRP A. Este laminado foi atravessado por uma fenda diagonal de corte nas proximidades do Ext.2, onde se registou uma extensão máxima de 7.7‰.

Na Tabela 4.26 apresentam-se os valores das extensões registadas no estribo instrumentado da viga 3S-5LI60-D e da viga 3S-R-D para três níveis de carga. O caso apresentado, ao contrário do sucedido nos exemplos das restantes séries de vigas, caracterizou-se pelo facto das extensões registadas no estribo instrumentado da viga reforçada serem maiores que as da viga de referência sem CFRP. Esta ocorrência deve-se ao facto da fenda de rotura de corte da viga de referência atravessar o estribo instrumentado praticamente na zona da ligação alma-banzo, o que não aconteceu na viga 3S-5LI60-D, ou seja, para esta viga a fenda de rotura de corte andou bastante mais perto da posição dos extensómetros do que a viga de referência, o que justifica os valores mais elevados das extensões.

Na Figura 4.87 apresenta-se a variação ocorrida durante o ensaio da viga 3S-5LI60-D das extensões nos laminados e estribo de aço que foram instrumentados. Estas figuras permitem comprovar que, numa fase inicial do carregamento, os elementos resistentes ao esforço transversal não foram activados. Tal ocorreu apenas no instante em que foram atravessados por uma fenda diagonal de corte. O primeiro laminado solicitado foi o CFRP B (Ext.4) para uma carga próxima dos 120 kN (formação de uma fenda de flexão-corte). Devido à formação desta fenda também houve a solicitação do estribo instrumentado na zona do Ext.2. Mais tarde, por volta dos 205 kN ocorreu uma fenda diagonal de corte que activou significativamente a zona dos elementos resistentes ao esforço transversal que atravessou (Ext.2 do CFRP B, Ext.3 do CFRP C e EXT. 1 do estribo de aço). Uma nova fenda de corte ocorreu por volta dos 300 kN nas proximidades do Ext.2 do CFRP A. Cerca dos 400 kN a primeira fenda de corte, que anteriormente foi mencionada, começou a abrir

significativamente o que provocou acréscimos consideráveis de extensões em alguns extensómetros. Logo de seguida a parte inferior do CFRP C cedeu motivando um acréscimo de tensão no CFRP B e no estribo instrumentado.

A informação do registo das extensões nos laminados e estribos instrumentados das restantes vigas da série D está apresentada no anexo C desta dissertação. A análise dos dados referentes à extensometria colocada nos estribos permitiu concluir que em todas as vigas com CFRP a carga máxima foi atingida com as armaduras transversais que foram instrumentadas com extensómetros em cedência.

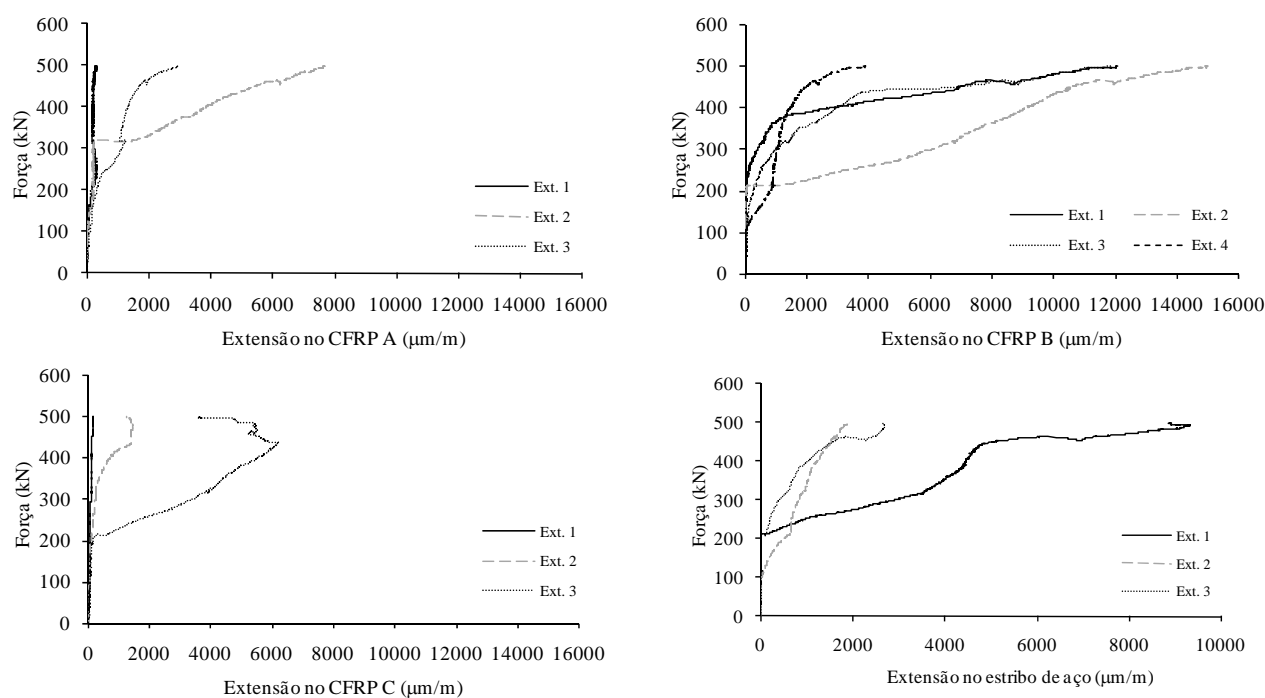


Figura 4.87 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-5LI60-D.

4.5.5.4 - Efeito da relação entre o vão de corte a e a altura útil da secção (a/d)

Na Tabela 4.27 apresenta-se uma análise comparativa dos valores de $\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ para vigas em que a diferença reside no valor da relação a/d e no tipo de betão (vigas com percentagem de estribos de aço semelhantes e a mesma percentagem e orientação de CFRP). Devido à importância crucial que a qualidade do betão tem no desempenho do reforço de CFRP, na comparação dos resultados das referidas vigas deve ser tido em conta o facto de o betão das vigas da série D ser superior ao das vigas da série B.

A análise dos dados da Tabela 4.27 permite verificar que, de um modo geral, a eficácia do reforço de CFRP foi maior para o caso das vigas com uma relação $a/d = 3.3$. O melhor desempenho do reforço

nas vigas com $a/d = 3.3$ aumentou com o aumento da percentagem de CFRP e com a percentagem de estribos de aço. Um outro aspecto que se destaca dos dados da Tabela 4.27 refere-se ao facto das soluções de laminados a 45° terem sido as mais eficazes para o caso das vigas com $a/d = 2.5$ enquanto que no caso das vigas com $a/d = 3.3$ a solução com laminados a 60° foi a mais eficaz.

Tabela 4.27 - Efeito da relação a/d (análise comparativa).

Percentagem de reforço de CFRP	Vigas com $a/d = 3.3$ [$f_{cm} = 59.4$ MPa]	$E1 = \Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ [%]	Vigas com $a/d = 2.5$ [$f_{cm} = 39.7$ MPa]	$E2 = \Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ [%]	E2/E1
0.08	3S-6LV-D	7.5	2S-4LV-B	11.1	0.68
0.13	3S-10LV-D	36.6	2S-7LV-B	23.1	1.58
0.08	3S-5LI45-D	36.7	2S-4LI45-B	29.3	1.25
0.13	3S-9LI45-D	56.6	2S-7LI45-B	38.8	1.46
0.07	3S-5LI60-D	38.3	2S-4LI60-B	27.2	1.41
0.11	3S-8LI60-D	62.4	2S-6LI60-B	29.8	2.09
0.08	5S-5LI45-D	36.6	4S-4LI45-B	19.1	1.92
0.13	5S-9LI45-D	53.2	4S-7LI45-B	28.7	1.85
0.07	5S-5LI60-D	35.8	4S-4LI60-B	19.5	1.84
0.11	5S-8LI60-D	59.8	4S-6LI60-B	23.2	2.58

Na Figura 4.88 apresentam-se as diferenças em termos dos modos de rotura das vigas com uma percentagem de armadura transversal de 0.10%. O mesmo tipo de informação está ilustrada na Figura 4.89 para as vigas com a maior percentagem de armadura transversal (0.16% para as vigas da série D e 0.17% para as vigas da série B). Complementarmente ao que já foi anteriormente dito sobre os modos de rotura, a análise das Figuras 4.88 e 4.89 permite concluir que para o caso das vigas com $a/d = 2.5$ existe uma maior concentração do padrão de fendilhação numa determinada zona do vão de corte reforçado com CFRP. Esta concentração de fendas pode originar uma degradação das condições de fixação dos reforços de CFRP aí inseridos e dessa forma promover cedências mais prematuras do reforço.

As considerações que se referiram nesta secção estão condicionadas a um facto que deve ser tido em linha de conta. Com efeito, tal como já foi mencionado anteriormente, as vigas com as mesmas soluções de CFRP, diferenciadas pelo valor da relação a/d , tinham betões de classe de resistência bastante diferente. O betão das vigas com $a/d = 2.5$ tinha um valor de $f_{cm} = 39.7$ MPa enquanto o das vigas com $a/d = 3.3$ tinha um valor de $f_{cm} = 59.4$ MPa. Atendendo aos modos de ruína observados,

concluí-se que o melhor desempenho registado nas vigas com $a/d = 3.3$ esteve mais associado à elevada resistência do betão do que a qualquer influência que se possa atribuir à relação a/d .

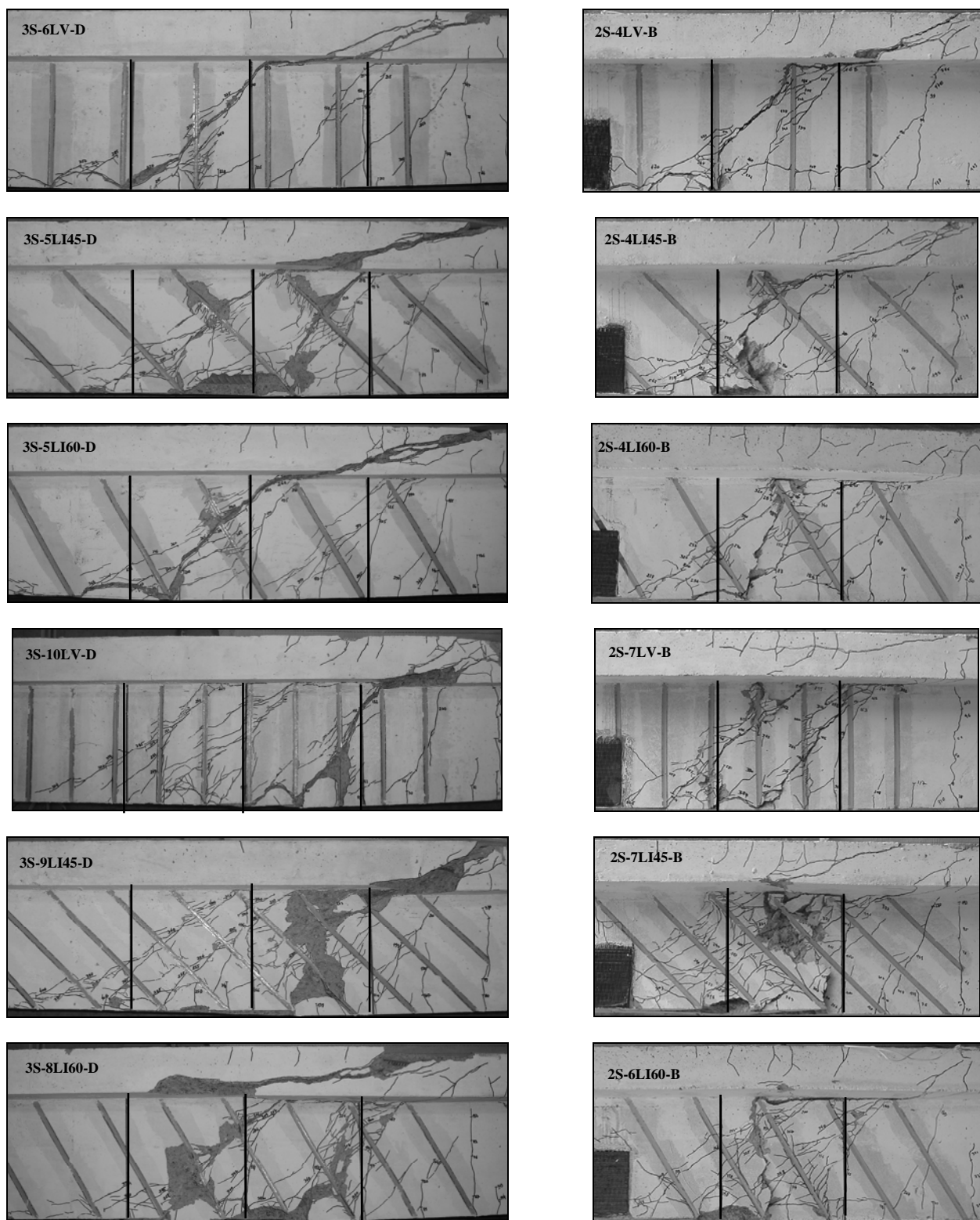


Figura 4.88 - Comparação do comportamento das vigas com $a/d=3.3$ (série D) com o de vigas com $a/d = 2.5$ (série B) reforçadas com as mesmas soluções de CFRP (vigas com ρ_{sw} de 0.10%).

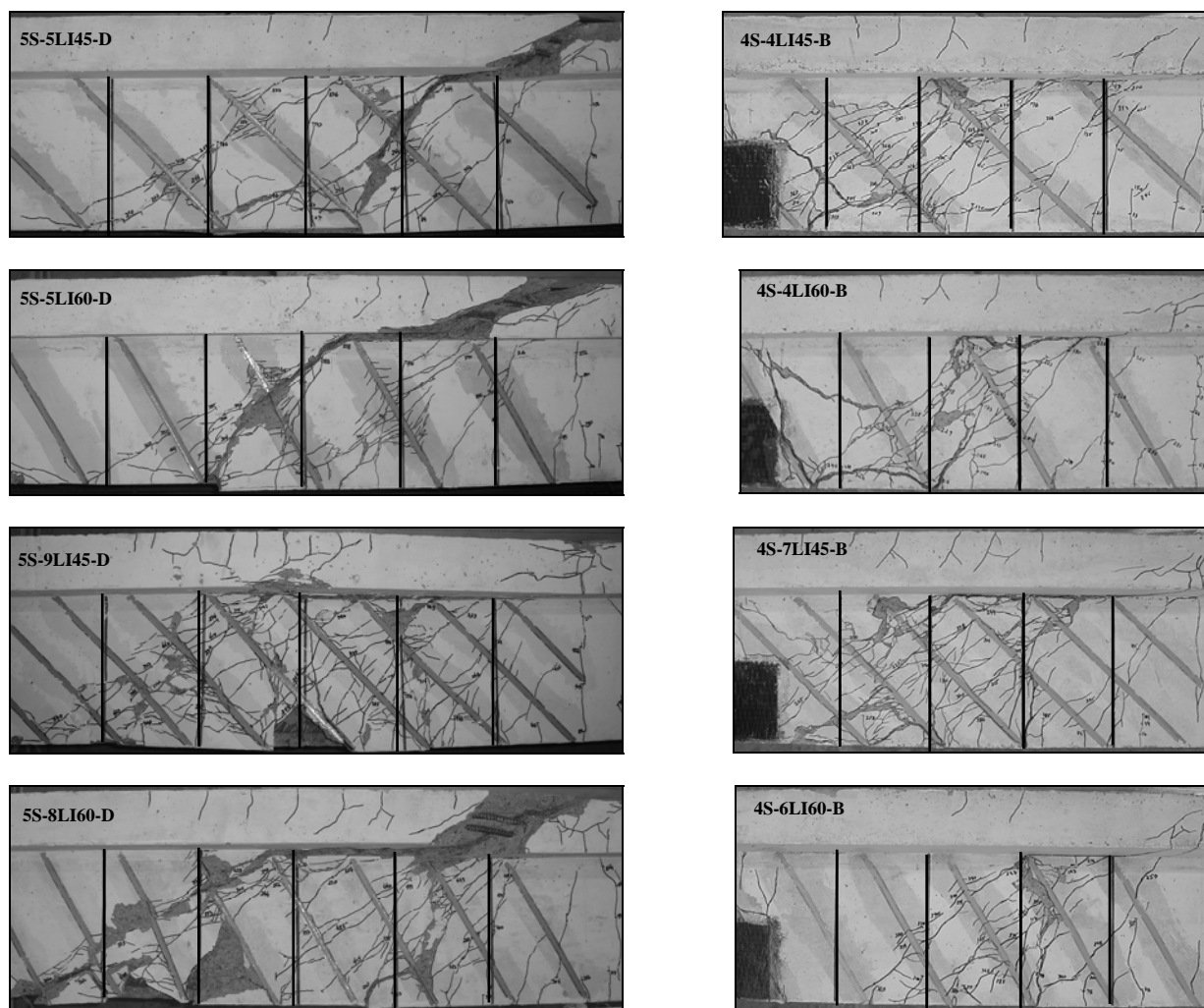


Figura 4.89 - Comparação do comportamento das vigas com $a/d=3.3$ (série D) com o de vigas com $a/d = 2.5$ (série B) reforçadas com as mesmas soluções de CFRP (vigas com ρ_{sw} de 0.16%-0.17%).

4.5.5.5 - Efeito da pré-fendilhação do betão

Na Tabela 4.28 apresentam-se os valores da força máxima (F_{max}) e respectiva flecha central ($u_{F_{max}}$) e da relação $\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$, obtidos a partir dos ensaios das vigas reforçadas com CFRP que foram pré-fendilhadas antes do referido reforço ter sido executado. Para uma análise do efeito da pré-fendilhação do betão na eficácia da técnica de reforço em estudo, na Tabela 4.28, também, se apresentam os referidos valores para as vigas reforçadas com as mesmas soluções de reforço, mas sem pré-fendilhação, e das respectivas vigas de referência. As curvas de comportamento carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga referentes às vigas mencionadas anteriormente estão representadas na Figura 4.90.

A análise da Figura 4.90 permite concluir que a principal diferença entre modelos reforçados ao corte, com e sem pré-fendilhação do betão, reside numa perda natural de rigidez inicial nos modelos pré-fendilhados, até ao nível de carga máxima aplicada no ensaio de pré-fendilhação. Após este patamar

de carga, as curvas dos modelos pré-fendilhados vão, progressivamente, para níveis próximos dos verificados nas curvas dos modelos não pré-fendilhados. Das quatro vigas reforçadas após a instalação de um determinado nível de fendilhação, em duas (3S-5LI45F2-D e 5S-5LI60F-D) os resultados, em termos de rigidez, carga máxima e respectiva flecha central, foram semelhantes aos obtidos nas vigas reforçadas com as mesmas soluções de reforço mas sem pré-fendilhação do betão. O desempenho estrutural das vigas 3S-5LI45F1-D e 5S-5LI45F-D foi ligeiramente superior ao das respectivas vigas sem pré-fendilhação (3S-5LI45F-D e 5S-5LI45-D). Em face do que se acaba de referir, com a excepção da quebra de rigidez inicial, a pré-fendilhação do betão não penalizou a eficácia da técnica de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos.

Tabela 4.28 - Principais resultados em termos de capacidade de carga (efeito da pré-fendilhação).

Viga	ρ_{sw} [%]	ρ_f [%]	F_{max} [kN]	$\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$ [%]	$u_{F_{max}}$ [mm]
3S-R-D	0.10	-	359.9	-	5.86
3S-5LI45-D	0.10	0.08	492.1	36.7	8.54
3S-5LI45F1-D	0.10	0.08	531.4	47.7	9.00
3S-5LI45F2-D	0.10	0.08	490.6	36.3	8.36
5S-R-D	0.16	-	409.7	-	6.86
5S-5LI45-D	0.16	0.08	559.5	36.6	11.09
5S-5LI45F-D	0.16	0.08	611.9	49.4	12.18
5S-5LI60-D	0.16	0.07	556.4	35.8	9.98
5S-5LI60F-D	0.16	0.07	554.8	35.4	9.73

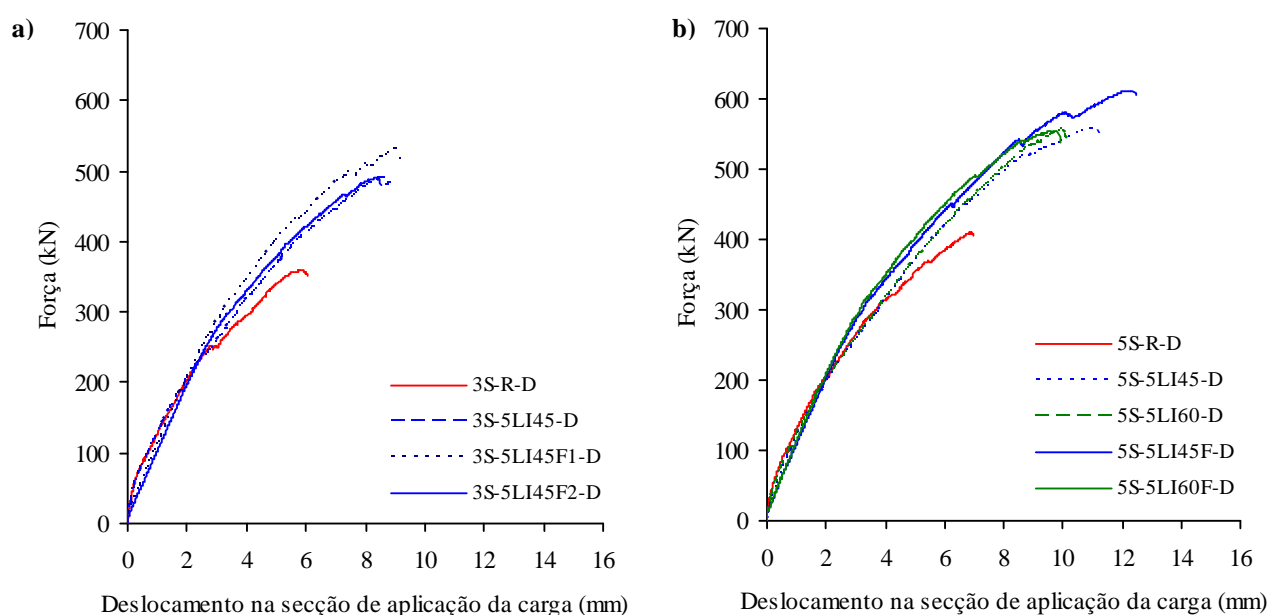


Figura 4.90 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas pré-fendilhadas: a) com três estribos de aço no vão de corte a ; b) com cinco estribos de aço no vão de corte a .

Nos ensaios à rotura das quatro vigas reforçadas ao corte com CFRP, após a pré-fendilhação do betão, constatou-se que para cargas inferiores à máxima força aplicada no ensaio tipo I (pré-fendilhação) as fendas existentes abriram progressivamente. Na Figura 4.91 apresenta-se a sequência do ensaio da viga 3S-5LI45F1-D. Nesta viga não se formaram mais fendas diagonais de corte do que as resultantes do ensaio de pré-fendilhação. Apenas se desenvolverem as já existentes. Até a viga atingir a sua carga máxima (531.4 kN) foram registadas algumas cedências dos elementos resistentes ao esforço transversal. Com efeito, cerca dos 429 kN registou-se a cedência da parte superior do segundo laminado a contar da secção de aplicação da carga. Este facto originou um acréscimo de tensão no laminado central (Figura 4.97-a) e no estribo central. Cerca dos 502 kN ocorreu o escorregamento da parte inferior quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga. Aos 508 kN houve cedência no laminado central junto à fenda de corte. A carga máxima ocorreu imediatamente antes da rotura do estribo mais próximo da secção da carga (Figura 4.93).

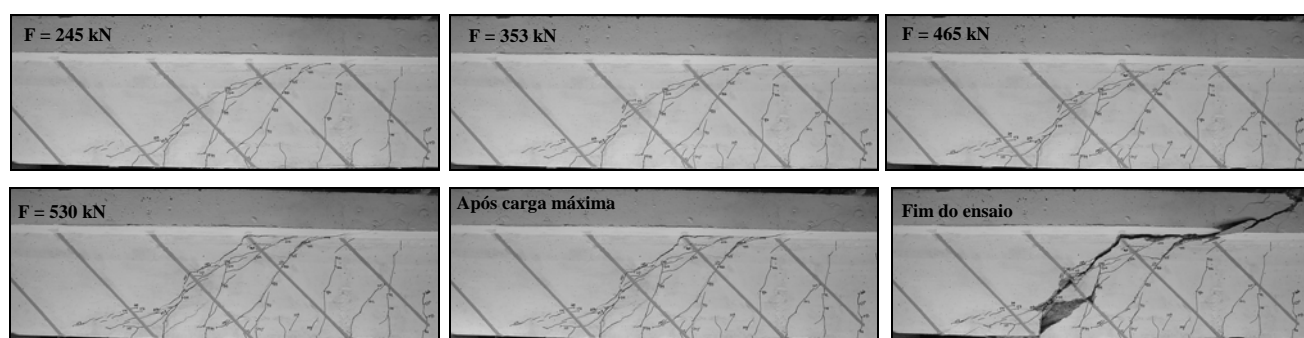


Figura 4.91 - Fases do ensaio da viga 3S-5LI45F1-D (carga máxima = 531.4 kN).

Na sequência do ensaio da viga 3S-5LI45F2-D, representada na Figura 4.92, é possível verificar que com o carregamento imposto no ensaio à rotura acabou por surgir mais uma fenda diagonal de corte (314 kN). Cerca dos 466 kN a parte inferior do laminado colocado na quarta posição a contar da secção de aplicação da carga cedeu (Figura 4.97-b). A carga máxima da viga ocorreu imediatamente antes da formação da fenda de corte no banzo da viga (Figura 4.97-c). O fim do ensaio correspondeu ao momento em que a fenda de rotura atinge a secção da carga provocando uma rotura violenta de acordo com o representado na Figura 4.92.

Nas fotografias do lado direito da Figura 4.93 apresentam-se as vigas 3S-5LI45-D (sem pré-fendilhação), 3S-5LI45F1-D e 3S-5LI45F2-D após o ensaio à rotura, onde as linhas verticais correspondem à localização dos estribos de aço e os círculos à posição das secções onde ocorreu a rotura dos estribos durante o ensaio. Nas fotografias do lado esquerdo da Figura 4.93 apresenta-se a comparação do padrão de fendilhação registado nas vigas pré-fendilhadas, após o ensaio tipo I, com o observado na viga 3S-5LI45-D para um nível de carga similar à máxima carga imposta no ensaio

de pré-fendilhação. A comparação do padrão de fendilhação das três vigas para este nível de carga permite verificar que o da viga 3S-5LI45-D (sem pré-fendilhação) não era tão difuso do que o das vigas 3S-5LI45F1-D e 3S-5LI45F2-D. Esta ocorrência evidencia o papel desempenhado pelo CFRP no controlo das fendas de corte.

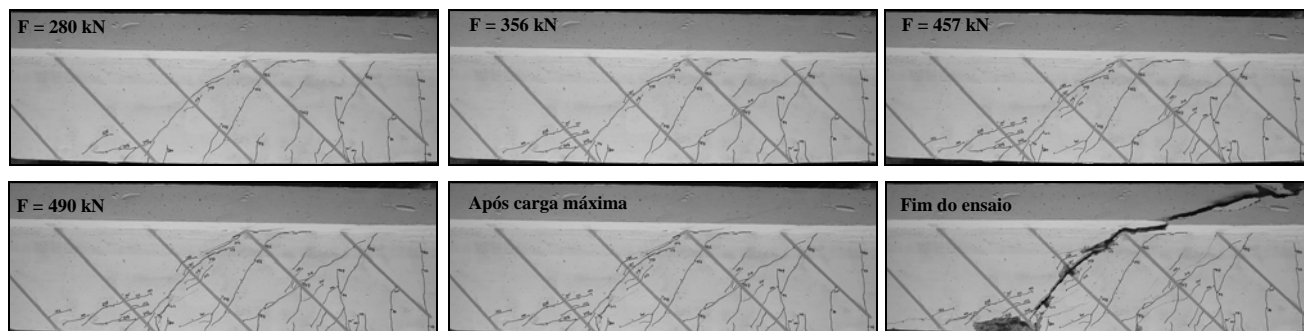


Figura 4.92 - Fases do ensaio da viga 3S-5LI45F2-D (carga máxima = 490.6 kN).

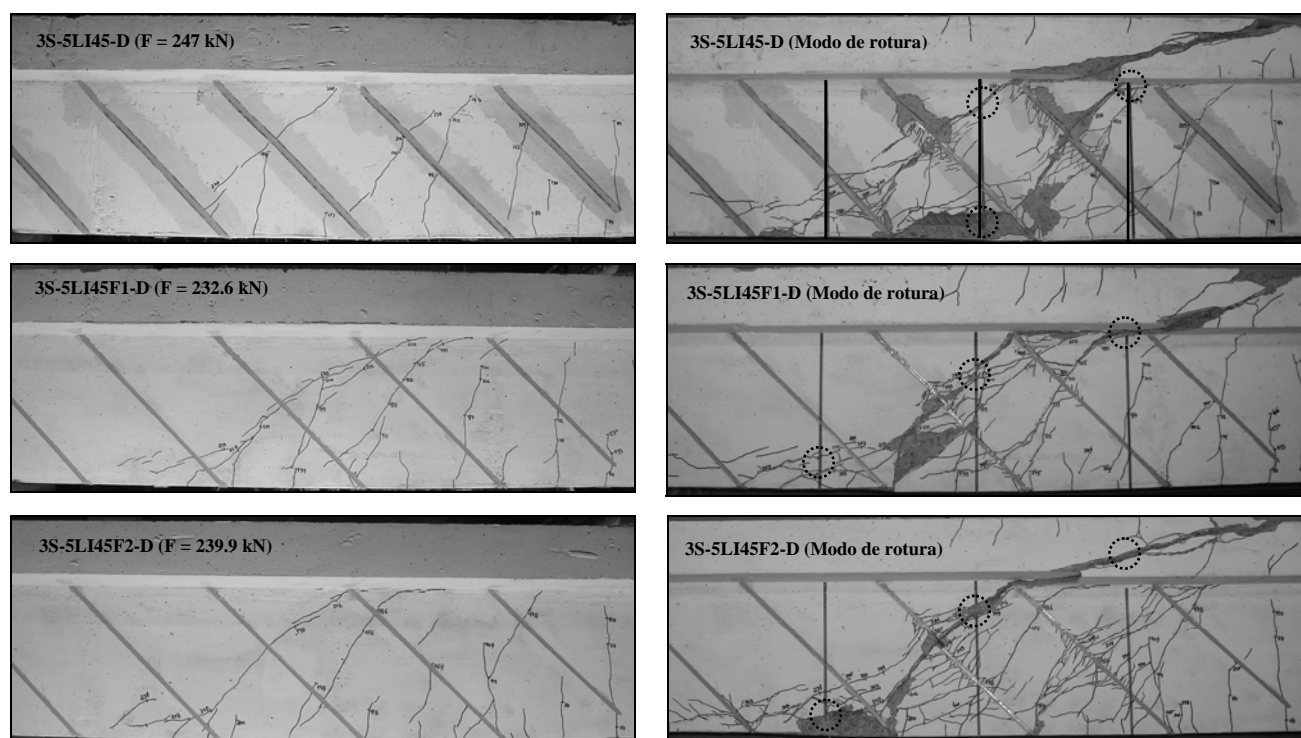


Figura 4.93 - Modos de rotura das vigas pré-fendilhadas com três estribos de aço no vão de corte a .

Na Figura 4.94 apresenta-se a sequência do ensaio da viga 5S-5LI45F-D. Nesta viga formaram-se mais fendas diagonais de corte do que as resultantes do ensaio de pré-fendilhação. A primeira surgiu, cerca dos 448 kN, entre o segundo e o terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga (Figura 4.97-d). Com o aumento do carregamento e com um adequado sistema de resistência às fendas de corte existentes acabou por surgir, cerca dos 542 kN, uma nova fenda diagonal de corte entre o apoio e a fenda de corte que até então lhe estava mais próximo (Figura 4.97-e). A carga máxima da viga ocorreu imediatamente antes de se dar uma rotura violenta, que correspondeu ao

fim do ensaio, cujo registo fotográfico se encontra na Figura 4.94. No início desta rotura foi possível observar uma perturbação no laminado central atravessado pela fenda de rotura de corte (no fim do ensaio verificou-se que este laminado tinha atingido a rotura).

No decorrer do ensaio à rotura da viga 5S-5LI60F-D (Figura 4.95) formou-se mais uma fenda de corte do que as resultantes do ensaio de pré-fendilhação. A carga máxima da viga ocorreu por cedência do laminado central, não pela sua extremidade mas na proximidade da fenda de corte de acordo com o pormenor apresentado na Figura 4.97-f.

Na Figura 4.96 apresentam-se as vigas 5S-5LI45-D e 5S-5LI60-D (ambas sem pré-fendilhação), 5S-5LI45F-D e 5S-5LI60F-D após os respectivos ensaios à rotura, onde as linhas verticais correspondem à localização dos estribos de aço e os círculos à posição das secções onde ocorreu a rotura dos estribos durante o ensaio. Nesta figura também se apresenta a comparação do padrão de fendilhação registado nas vigas pré-fendilhadas, após o ensaio tipo I, com observado nas respectivas vigas sem pré-fendilhação para um nível de carga similar à máxima carga imposta no ensaio de pré-fendilhação. A comparação do padrão de fendilhação para este nível de carga permite verificar, tal como já foi constatado anteriormente para o caso das vigas com três estribos de aço no vão de corte a , que o das vigas sem pré-fendilhação não foi tão difuso do que o que foi imposto nas vigas 3S-5LI45F1-D e 3S-5LI45F2-D.

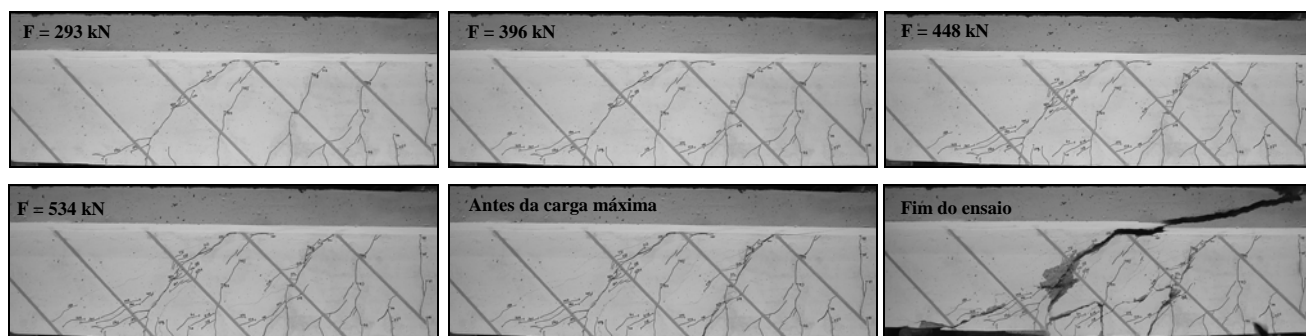


Figura 4.94 - Fases do ensaio da viga 5S-5LI45F-D (carga máxima = 611.9 kN).

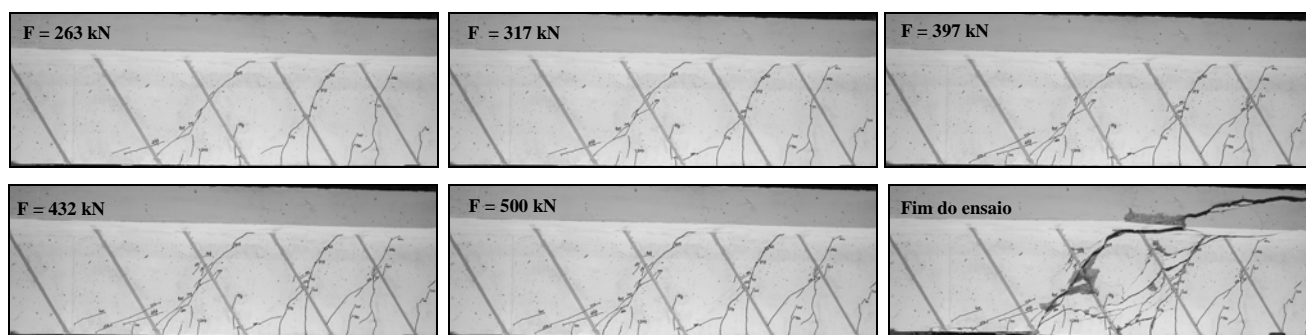


Figura 4.95 - Fases do ensaio da viga 5S-5LI60F-D (carga máxima = 554.8 kN).

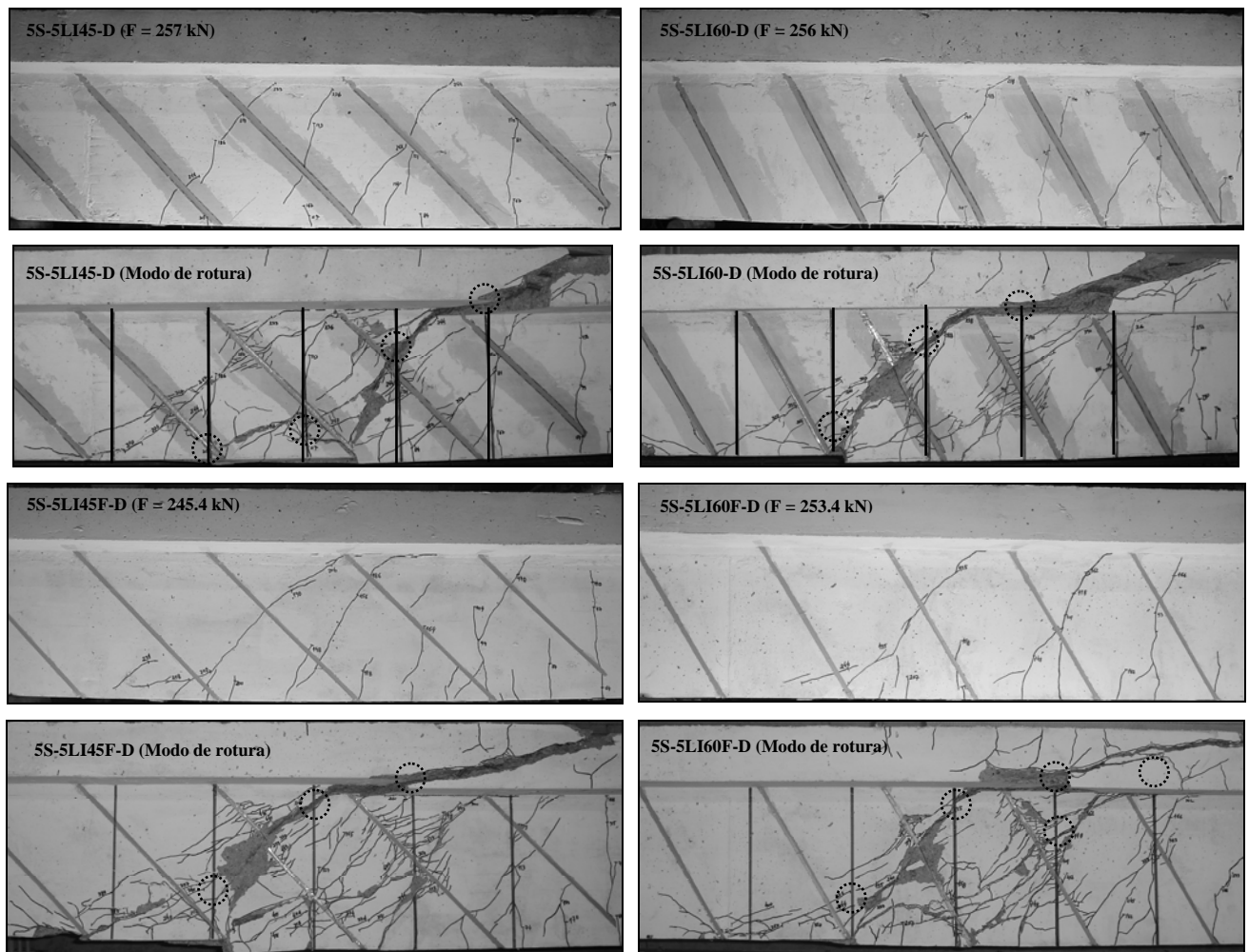


Figura 4.96 - Modos de rotura das vigas pré-fendilhadas com cinco estribos de aço no vão de corte a .

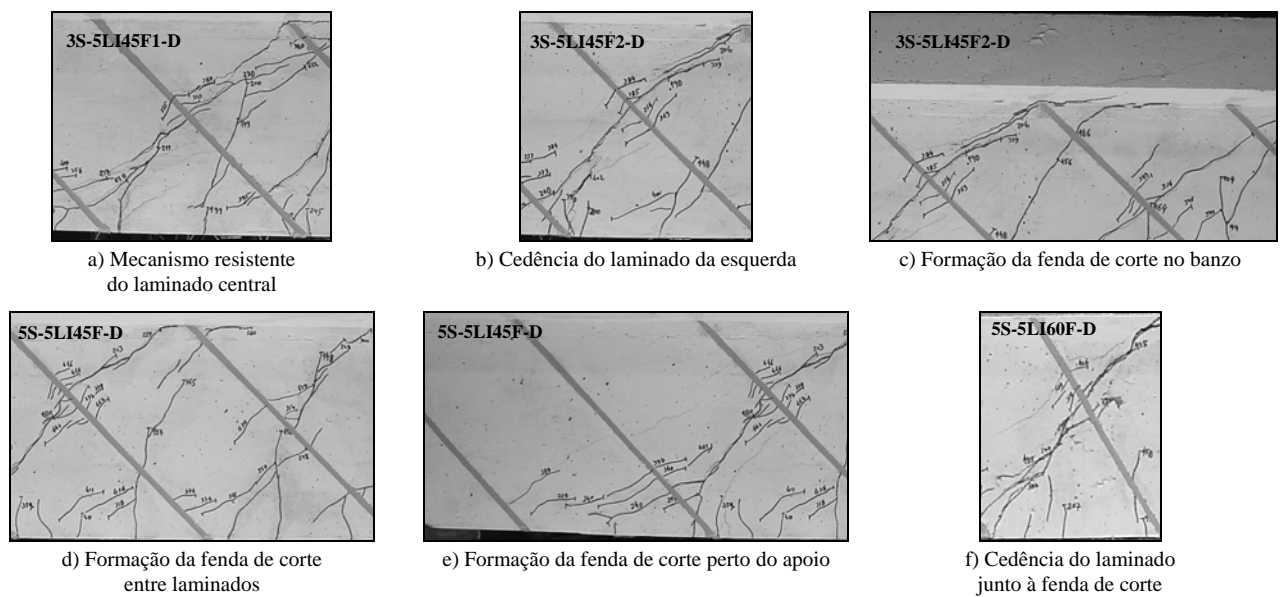


Figura 4.97 - Pormenores dos ensaios das vigas com CFRP pré-fendilhadas.

Na Tabela 4.29 apresentam-se, para cada viga reforçada após ser pré-fendilhada, os valores das extensões registadas nos extensómetros colados em cada um dos CFRP instrumentados (Figuras 4.69

e 4.74) correspondentes à carga máxima (F_{max}). Para o caso em que a extensão máxima nos CFRP ocorreu para uma carga inferior a F_{max} , os valores registados nos extensómetros nesse instante encontram-se entre parêntesis curvos. Além disso, na Tabela 4.29 apresenta-se para cada viga reforçada, o valor da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados antes das vigas atingirem a rotura (ϵ_{CFRP}^{max}), assim como, o valor médio das extensões máximas registadas nos três CFRP instrumentados (ϵ_{CFRP}^{max})_m.

Tabela 4.29 - Análise dos valores obtidos nos extensómetros colados no CFRP nas vigas da série D (com pré-fendilhação).

Viga	CFRP	$\epsilon_{Ext.1}$ [‰]	$\epsilon_{Ext.2}$ [‰]	$\epsilon_{Ext.3}$ [‰]	$\epsilon_{Ext.4}$ [‰]	$\epsilon_{Ext.5}$ [‰]	ϵ_{CFRP}^{max} [‰]**	(ϵ_{CFRP}^{max}) _m [‰]
3S-5LI45F1-D	A	2.04	13.39	-	-	-	13.4	12.0
	B	9.17	14.94	12.37	4.23	0.31	14.9 (12.0)	
	C*	3.41 (7.81)	-	-	-	-	7.8	
3S-5LI45F2-D	A	1.13	9.03	-	-	-	9.0	10.6
	B	5.18	13.45	10.27	3.03	2.71	13.5 (12.0)	
	C*	7.97 (9.26)	-	-	-	-	9.3	
5S-5LI45F-D	A	1.06	9.76	8.30			9.8	10.3
	B	7.93	12.06	8.51	5.84	4.75	12.1 (11.2)	
	C*	8.62 (8.88)					8.9	
5S-5LI60F-D	A	11.75	12.94	5.40	-	-	12.9	11.0
	B	9.73	14.77	10.71	4.85	-	14.8 (14.1)	
	C*	2.95 (5.18)	-	-	-	-	5.2	

* Os valores das extensões entre parêntesis referem-se à carga para a qual ocorreu a máxima extensão no CFRP instrumentado antes da carga máxima (502 kN no CFRP C da viga 3S-5LI45F1-D, 466 kN no CFRP C da viga 3S-5LI45F2-D, 543.2 kN no CFRP C da viga 5S-5LI45F-D, 481.9 kN no CFRP C da viga 5S-5LI60F-D).

** Os valores das extensões entre parêntese referem-se ao valor máximo da extensão no CFRP observado na viga com a mesma solução de reforço mas sem pré-fendilhação do betão.

Da análise dos dados da Tabela 4.29 é possível verificar que o valor máximo das extensões registadas nas vigas reforçadas com CFRP variou entre os 12.1‰ na viga 5S-5LI45F-D e os 14.9‰ na viga 3S-5LI45F1-D, ou seja, 74% e 91%, respectivamente, da extensão de rotura do CFRP obtida nos ensaios de tracção uniaxial (Tabela 4.22). Em termos da extensão (ϵ_{CFRP}^{max})_m, a variação foi entre os 10.3‰ na viga 5S-5LI45F-D e os 12.0‰ na viga 3S-5LI45F1-D. A média dos valores máximos de ϵ_{CFRP}^{max} e dos valores de (ϵ_{CFRP}^{max})_m para as vigas com CFRP ensaiadas na presente série foi de 13.8‰ e 10.9‰, respectivamente.

A comparação dos valores máximos de ε_{CFRP}^{max} registadas nas vigas pré-fendilhadas com os das respectivas vigas sem pré-fendilhação do betão permite constatar que os referidos valores foram maiores no primeiro caso. Para tal, contribui o facto do extensómetro onde se registaram os valores de pico das extensões (Ext.2 do CFRP B) ter sido colocado, no caso das vigas pré-fendilhadas, na secção do laminado atravessado pela fenda diagonal de corte que mais solicitou o CFRP.

Os dados da Tabela 4.29 permitem concluir que o laminado central foi o mais mobilizado, nomeadamente, na zona onde estava colado o Ext.2. No nível seguinte de mobilização do reforço esteve o CFRP A, concretamente, a zona associada ao Ext.2. Em ambos os casos, os extensómetros estavam colados em secções atravessadas por uma fenda de corte resultante do ensaio de pré-fendilhação. De acordo com o observado na Figura 4.74, a fenda de corte associada ao CFRP A não foi a mesma que mobilizou o CFRP B. As extensões máximas registadas no laminado C foram as mais baixas dos três CFRP instrumentados. Além disso, verificou-se que nas quatro vigas em análise a extensão máxima no CFRP C não foi alcançada para a carga máxima (F_{max}), mas sim para uma carga prévia a F_{max} , ou seja, este elemento resistente ao esforço transversal não resistiu na sua plenitude na altura em que a viga atingiu a carga máxima.

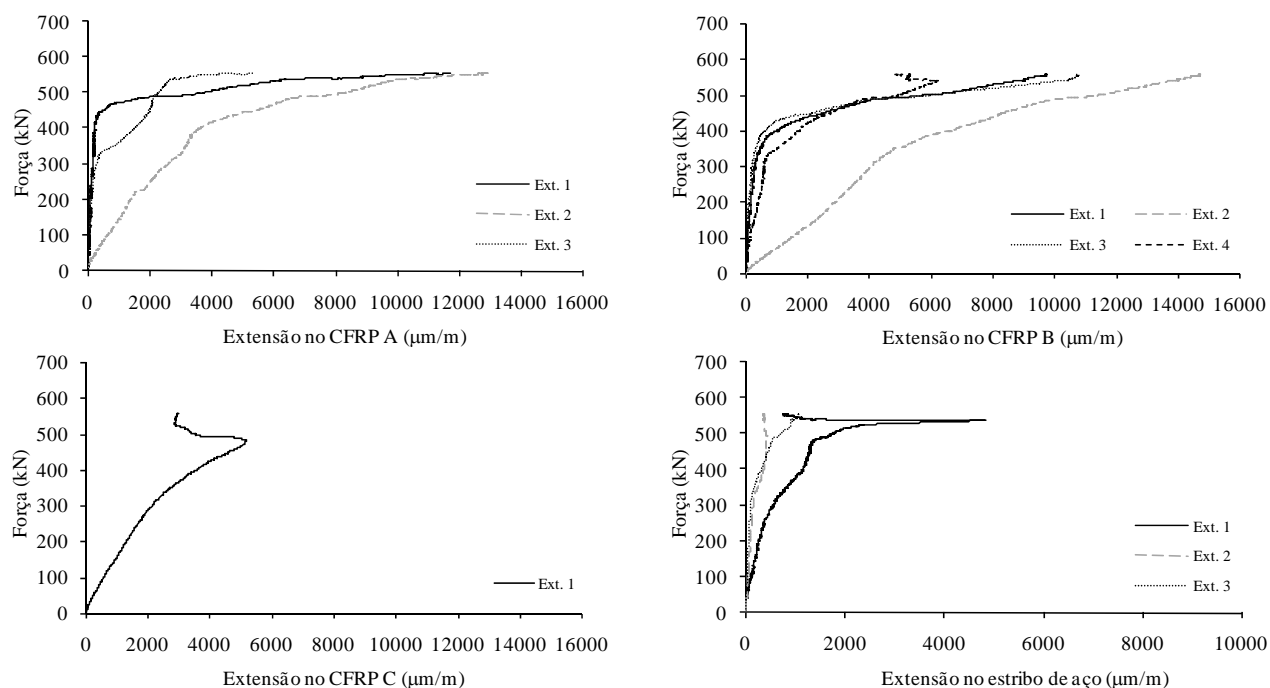


Figura 4.98 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 5S-5LI60F-D.

Algumas das constatações que se acabam de referir podem ser observadas na Figura 4.98 onde se apresenta a variação, ocorrida durante o ensaio da viga 5S-5LI60F-D até atingir a sua carga máxima, das extensões nos laminados e estribo de aço que foram instrumentados. Atendendo à localização dos extensómetros nos laminados instrumentados (Figura 4.74), verifica-se que os que foram colados, nas

secções dos CFRP atravessadas pelas fendas de corte provocadas pelo carregamento do ensaio de pré-fendilhação, foram solicitados logo no início do carregamento do ensaio à rotura (Ext.2 do CFRP A, Ext.2 do CFRP B e Ext.1 do CFRP C). O Ext.2 do CFRP A estava associada a uma fenda de corte diferente da que activou o Ext.2 do CFRP B e o Ext.1 do CFRP C. A gama de valores das extensões registadas na parte inicial do ensaio à rotura da viga 5S-5LI60F-D permite verificar que a fenda que atravessou o CFRP B e C, nomeadamente, na secção onde foi colado o Ext.2 foi a que mais solicitou o reforço. Apesar de ser o Ext.2 do CFRP B que registou o valor mais elevado da extensão no CFRP (14.8‰), no CFRP A, devido a outra fenda de corte, também foram atingidos valores elevados de extensão no CFRP (12.9‰). O laminado C foi, dos três instrumentados, o que atingiu menores valores para a extensão no CFRP e o seu valor máximo foi registado para uma carga inferior à carga máxima da viga. O comportamento do estribo instrumentado revela que a sua mobilização foi feita desde o início do ensaio à rotura da viga. O Ext.2 foi o que registou maiores valores de extensão por ser o que estava mais próximo da fenda de corte que atravessava o estribo instrumentado.

A informação do registo das extensões nos laminados e estribos instrumentados das restantes vigas pré-fendilhadas da série D está apresentada no anexo C desta dissertação. A análise dos dados referentes à extensometria colocada nos estribos permitiu concluir que em todas as vigas com CFRP a carga máxima foi atingida com as armaduras transversais em cedência.

4.5.5.6 - Considerações sobre os resultados obtidos na série D

A realização dos ensaios das vigas da série D e os resultados que foram obtidos permite avançar com algumas considerações, que serão tidas em conta mais adiante na análise geral dos resultados do programa experimental descrito ao longo deste capítulo, e que se passam a expor:

- O uso da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da percentagem de armadura transversal, da orientação e percentagem de CFRP e do betão estar ou não pré-fendilhado antes da aplicação do reforço de CFRP, permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga de vigas de betão armado de secção em T, com rotura por corte, e com um valor da relação a/d igual a 3.3. Exceptuando o modelo com a menor percentagem de laminados verticais, as soluções de reforço de CFRP estudadas proporcionaram um aumento da capacidade máxima de carga que variou entre os 35% e os 62%.
- Os ganhos de resistência proporcionados pelos sistemas de reforço em CFRP adoptados ($\Delta F_{max} / F_{max}^{ref}$) foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, maiores valores de ρ_f garantiram maiores aumentos da capacidade resistente. Em termos de orientação dos laminados,

independentemente da percentagem de CFRP, as soluções com laminados inclinados foram mais eficazes que as soluções com laminados verticais. De um modo geral, as soluções de laminados inclinados a 60° foram ligeiramente mais eficazes que as soluções de laminados a 45° , principalmente para a percentagem mais elevada de CFRP testada.

- Numa fase inicial, até ao nível de carga máxima do ensaio de pré-fendilhação, os modelos reforçados pré-fendilhados apresentaram menor rigidez em relação aos modelos reforçados sem pré-fendilhação. Após o mencionado patamar de carga, as curvas dos modelos reforçados pré-fendilhados foram, progressivamente, para níveis próximos dos verificados nas curvas dos modelos reforçados não pré-fendilhados. O grau de eficácia do reforço no comportamento estrutural das vigas, após a fase inicial referida anteriormente, foi ditado pelo número de elementos resistentes ao esforço transversal que atravessavam as fendas de corte. A instalação de um estado de fendilhação no betão, contendo fendas diagonais de corte, previamente à aplicação do reforço de CFRP fez com que, ao contrário do que aconteceu nas vigas não pré-fendilhadas, os reforços ao esforço transversal atravessados pelas referidas fendas fossem logo activados a partir do momento em que os modelos reforçados começaram a ser solicitados até à rotura. Nas vigas sem pré-fendilhação, o efeito do reforço de CFRP apenas foi efectivo a partir do momento em que surgiram as fendas de corte, garantindo um acréscimo de rigidez que aumentou com a percentagem de CFRP.
- A resistência do betão tem um papel fundamental no desempenho da técnica de reforço ao corte em estudo. Na série de vigas D o betão tinha uma resistência à compressão, à data do ensaio das vigas, de 59.4 MPa. Tipicamente, os modos de rotura das vigas desta série estiveram associados à cedência dos laminados que, de modo geral, ocorreu de forma diferente ao que aconteceu nas vigas das séries anteriores, que continham betões de resistência mais baixa. Com efeito, nas vigas da série D, devido à elevada resistência do betão, os laminados de CFRP acabaram por escorregar e, em alguns casos, atingiram a rotura. Estes modos de rotura fizeram com que nesta série de vigas tivessem sido alcançados desempenhos notáveis do reforço de CFRP em termos do acréscimo de rigidez, de capacidade de carga máxima, de deformação na rotura e do grau de mobilização do reforço de CFRP. A extensão máxima registada nos laminados instrumentados variou entre os 8.2‰ e os 15.0‰, ou seja, a mobilização do reforço de CFRP variou entre os 50% e os 92% da sua capacidade máxima resistente. Os valores mais elevados da mobilização do CFRP foram registados nas vigas com a menor percentagem de reforço. Os modelos pré-fendilhados conduziram a valores das extensões máximas no CFRP superiores às observadas nas vigas não pré-fendilhadas.

- As considerações que se fizeram anteriormente devem ser tidas em conta na análise do efeito da relação a/d na eficácia da técnica de reforço ao corte em análise. Com efeito, ao comparar soluções de reforço iguais, aplicadas a vigas com $a/d = 2.5$ e vigas com $a/d = 3.3$, deve ser considerado o facto dos betões apresentarem gamas de resistência diferentes, o que face ao que já foi referido, pode condicionar, em termos quantitativos, as diferenças existentes. De um modo geral, a eficácia do reforço de CFRP foi maior para o caso das vigas com uma relação $a/d = 3.3$. O melhor desempenho do reforço nas vigas com $a/d = 3.3$ aumentou com o aumento da percentagem de CFRP e com a percentagem de estribos de aço.
- No comportamento das vigas com $a/d = 3.3$ reforçadas ao corte com CFRP destacou-se a formação de dois tipos de fendas de corte. As que se formaram mais junto ao apoio e as que se formaram mais perto da zona de aplicação da carga. De um modo geral, as primeiras foram menos inclinadas que as segundas e, por conseguinte, foram atravessadas por um maior número de elementos resistentes ao esforço transversal. O que se passou em algumas vigas foi que a fenda de corte com menor inclinação foi devidamente sustentada e a rotura acabou por se dar na fenda de corte com maior inclinação (menor número de elementos resistentes ao esforço transversal a atravessar a fenda).
- Das vigas com a maior percentagem de CFRP testadas na série D apenas na 5S-9LI45-D a rotura da viga provocou o destacamento de uma parede de betão e CFRP. Se no caso das vigas da série C, o betão de fraca qualidade conduziu a um aceleração da ocorrência deste tipo de rotura, o betão de elevada resistência das vigas da série D retardou ou evitou mesmo que ocorresse.

Capítulo 5

Análise geral dos resultados experimentais do Capítulo 4

No Capítulo 4 foi apresentado um programa experimental realizado com o objectivo de ser avaliado o desempenho da técnica de reforço ao corte de vigas T de betão armado, que se baseia na inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da alma das vigas. Concretamente, foram ensaiadas quatro séries de vigas (A, B, C e D) de forma a avaliar o efeito de um conjunto de parâmetros na eficácia da mencionada técnica de reforço. Para cada uma das séries ensaiadas, os resultados obtidos foram apresentados e discutidos, tendo também sido avançadas algumas considerações sobre os mesmos. No presente capítulo será efectuada uma análise geral dos resultados de toda a investigação experimental realizada no Capítulo 4, de forma a extrair conclusões sobre um conjunto de aspectos necessários para uma fundamentada escolha da referida técnica de reforço ao corte, em alternativa às já existentes, com ou sem CFRP.

A análise geral aos resultados da investigação experimental realizada no capítulo anterior desta dissertação incidirá nos seguintes tópicos:

- Comportamento geral de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos;
- Comparação da eficácia da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP com a da técnica da colagem externa de mantas de CFRP, e com a da solução baseada na utilização de estribos de aço;
- Modos de rotura observados;
- Influência da classe de resistência do betão, da orientação e da percentagem de CFRP, da percentagem de armadura transversal e da relação a/d , no desempenho da técnica de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos.

As propostas de dimensionamento para o reforço ao corte de vigas de betão armado com materiais compósitos de CFRP aplicados segundo a técnica da colagem externa, apresentadas pelo American Concrete Institute (ACI Committee 440, 2002) e pela Fédération Internationale du Béton (*fib* - Bulletin 14, 2001), têm como base o conceito de extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}). Este parâmetro é utilizado por forma a simular, para uma determinada solução de reforço, o nível de mobilização do CFRP na altura da rotura da viga. Cada uma das mencionadas propostas avança com expressões para quantificar a extensão efectiva no CFRP, partindo de bases de dados que contêm os resultados referentes a trabalhos experimentais disponíveis na bibliografia da especialidade. Este procedimento

também será adotado no caso da técnica de reforço ao corte proposta nesta dissertação. Assim, na análise geral de resultados, que será realizada no âmbito do presente capítulo, dar-se-á especial atenção à contribuição dos laminados de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f) e ao valor da respectiva extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}).

5.1 - COMPORTAMENTO GERAL DE UMA VIGA DE BETÃO ARMADO REFORÇADA AO CORTE COM LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS

Tal como a Figura 5.1 ilustra, o comportamento típico de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos, quando o reforço é aplicado na viga antes de lhe introduzir qualquer tipo de dano, apresenta duas fases. Na primeira (Fase I), o diagrama de comportamento da viga com CFRP acompanha o da viga não reforçada até ao momento em que se formam as fendas de corte na viga sem CFRP. A partir deste nível de carregamento (início da segunda fase - Fase II), a presença do CFRP conjugada com a dos estribos de aço proporcionam a existência de um mecanismo mais eficaz de contenção ao desenvolvimento das fendas de corte, o que propicia um aumento de rigidez relativamente ao que acontece na viga não reforçada. Para as percentagens de CFRP adoptadas no presente trabalho, de um modo geral, esta rigidez aumenta com a percentagem de CFRP. A segunda fase do comportamento de uma viga reforçada ao corte com o CFRP inserido culmina quando esta atinge a sua capacidade máxima resistente (F_{max}^{CFRP}). Na Fase II do comportamento, para cada nível de deslocamento, as vigas com CFRP apresentam capacidade de carga superior à da correspondente viga não reforçada de referência. Além disso, de um modo geral, o deslocamento correspondente à carga máxima das vigas reforçadas ($u_{F_{max}}^{CFRP}$) é superior ao da viga sem CFRP ($u_{F_{max}}^{ref}$).

Tendo em consideração o que se acaba de referir, e baseado na análise do comportamento de quarenta e cinco vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos sem pré-fendilhação do betão, é possível concluir que a técnica em estudo para o reforço ao corte de vigas de betão armado proporcionou um aumento de rigidez em serviço (estados limites de utilização) e da resistência última (estados limites últimos) em relação ao verificado nos modelos não reforçados. O mesmo se passou em termos de flecha última na secção de aplicação da carga para um número muito significativo de vigas ensaiadas. Na Figura 5.1 ilustram-se as diferenças existentes entre o comportamento de uma viga reforçada ao corte com CFRP e o de uma viga sem o referido reforço. As diferenças entre o padrão de fendilhação da viga de referência e da viga com CFRP, para vários níveis de carregamento, estão ilustradas na Figura 5.2.

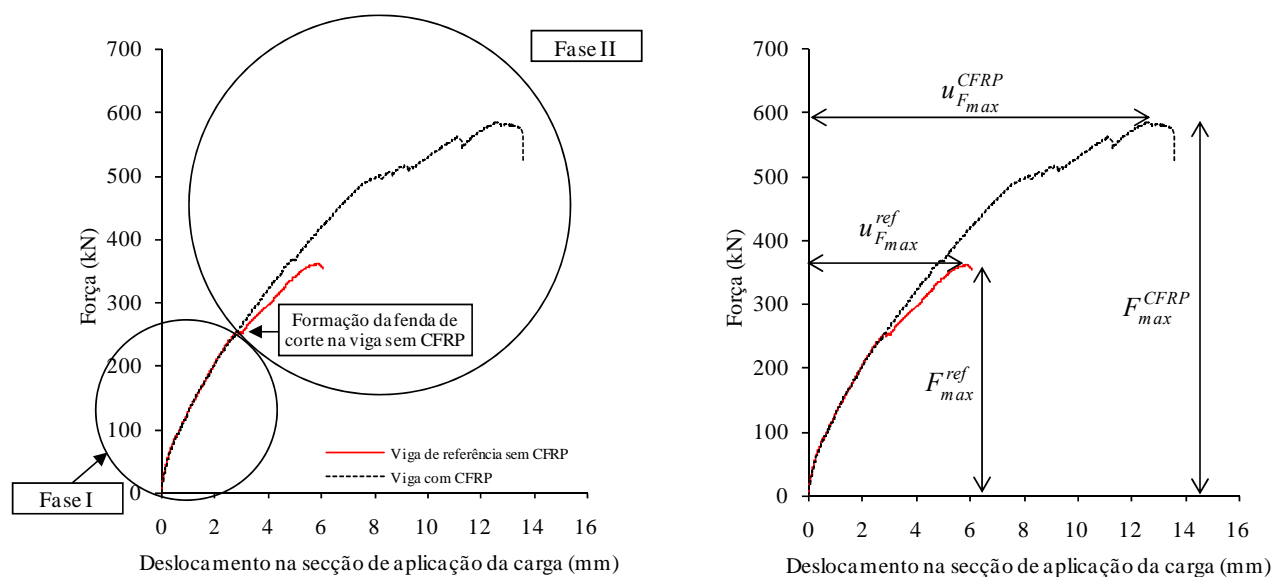


Figura 5.1 - Comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte por inserção de laminados de CFRP (comparação com o comportamento de uma viga não reforçada).

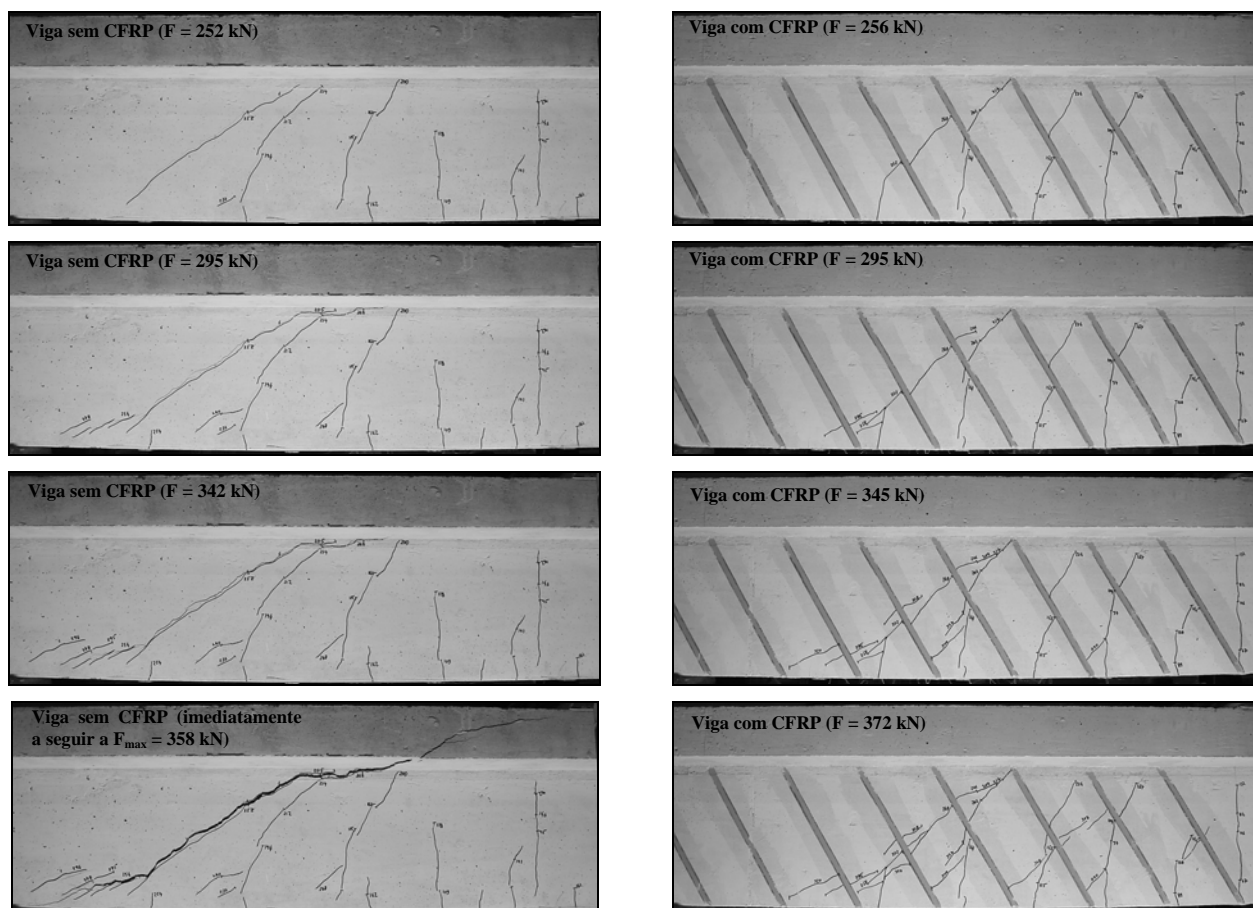


Figura 5.2 - Comparação do padrão de fendilhação de uma viga com e sem o reforço de CFRP.

A instalação de um determinado estado de fendilhação no betão previamente à aplicação do reforço de CFRP, contendo fendas de corte, conduziu a que, até ao nível de carga de pré-fendilhação, os modelos reforçados nestas condições apresentassem menor rigidez em relação à verificada nos

modelos reforçados não pré-fendilhados. Após este patamar de carga, as curvas dos modelos pré-fendilhados foram, progressivamente, para níveis próximos dos verificados nas curvas dos modelos não pré-fendilhados. Em termos de estados limites últimos constatou-se que o comportamento dos modelos reforçados com compósitos de CFRP foi condicionado pelo padrão de fendilhação que se instalou na viga, bem como do número de laminados que atravessavam as fendas de corte. Na Figura 5.3 (adaptada da Figura 4.90-a) apresenta-se o comportamento de três vigas reforçadas ao corte com laminados inseridos e diferenciadas pela pré-fendilhação (duas vigas) ou não (uma viga) do betão antes da aplicação do CFRP. A viga com CFRP que apresentou melhor desempenho tinha três laminados por face a atravessar a fenda crítica de rotura, enquanto as outras duas tinham apenas dois laminados (ver Figura 4.93). Além disso, na primeira das vigas os comprimentos de amarração dos laminados eram iguais ou superiores aos registados nas outras duas vigas. Estes factos tiveram consequências, quer em termos de rigidez como em termos de capacidade de carga e de deformação na rotura, conforme se pode observar na Figura 5.3.

Ao contrário do que ocorreu nas vigas sem pré-fendilhação do betão, os reforços de CFRP atravessados pelas fendas de corte, previamente induzidas antes da execução do reforço, foram activados desde o início do carregamento das vigas. Nas vigas sem pré-fendilhação do betão, tal só ocorreu para um nível de carregamento correspondente ao aparecimento de fendas de corte que atravessavam o reforço de CFRP. Cenários semelhantes também foram observados em termos da mobilização da armadura transversal (estribos de aço).

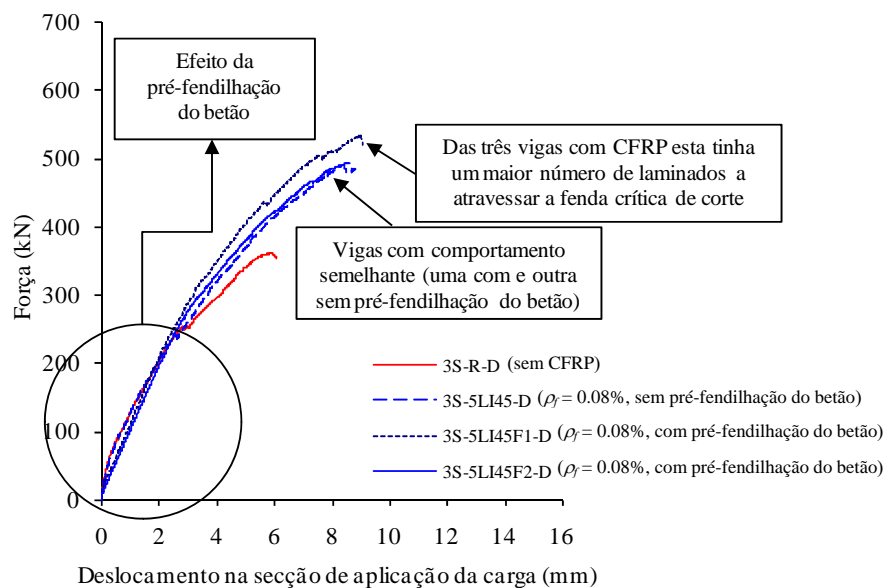


Figura 5.3 - Efeito da pré-fendilhação do betão na eficácia da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP (adaptada da Figura 4.90-a).

5.2 - REFORÇO AO CORTE COM LAMINADOS DE CFRP VS SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA O AUMENTO DA CAPACIDADE RESISTENTE AO ESFORÇO TRANSVERSO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO

A eficácia da técnica de reforço ao corte em análise nesta dissertação foi quantificada por intermédio da comparação directa entre o comportamento de vigas com e sem o reforço de CFRP. Complementarmente, o desempenho da técnica de laminados de CFRP inseridos foi comparado com o de outras duas formas alternativas de incrementar a capacidade resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado: uma recorrendo igualmente a materiais compósitos de CFRP, mas por intermédio da colagem externa de mantas; e outra adoptando a solução convencional em betão armado por intermédio da aplicação de um número de estribos de aço que, em fase de pré-dimensionamento, garanta a mesma capacidade de carga máxima das vigas reforçadas com CFRP.

Os modelos reforçados ao corte por inserção de laminados de CFRP registaram, em comparação com modelos em betão armado de resistência máxima equivalente, um acréscimo de rigidez em serviço, uma diminuição da flecha última e valores de carga máxima ligeiramente inferiores. Estas constatações foram observadas nas duas séries de vigas (série A: ver Figura 4.10-c; e série B: ver Figura 4.30) em que este tipo de comparação foi efectuado. Conforme pode ser constatado na Tabela 5.1 (resultados relativos a vigas pré-dimensionadas para terem a mesma capacidade de carga máxima), em média, o valor máximo da força (F_{max}) registada nas vigas com laminados inseridos (NSM), relativamente às soluções de betão armado equivalentes, foi de 93%. Para o caso do reforço com mantas de CFRP (EBR) esta relação foi de 79%. Em termos de flecha na rotura ($u_{F_{max}}$), nas vigas com laminados inseridos e na viga reforçada com mantas de CFRP foram registados valores iguais a 75% e 88%, respectivamente, dos registados nas vigas de betão armado.

Tabela 5.1 - Comparação do comportamento na rotura de três diferentes soluções de reforço para aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado.

Parâmetros avaliados	Série A*		Série B**		
	Betão armado ($\rho_{sw} = 0.24\%$)	NSM*** ($\rho_{sw} = 0.10\%$) ($\rho_f = 0.13-0.16\%$)	Betão armado ($\rho_{sw} = 0.28\%$)	NSM*** ($\rho_{sw} = 0.10\%$) ($\rho_f = 0.16-0.19\%$)	EBR ($\rho_{sw} = 0.10\%$) ($\rho_f = 0.21\%$)
Carga máxima, F_{max} [kN]	410.0	394.7	467.5	418.9	370.1
Flecha na rotura, $u_{F_{max}}$ [mm]	7.40	5.72	8.78	6.43	7.77

* Na série A apenas foi comparada a solução NSM (laminados) com a solução de betão armado. ** Na série B foi comparada a solução NSM (laminados) com a solução de betão armado e com a solução EBR (manta). *** Os valores apresentados para a carga máxima e para a flecha na rotura dizem respeito à média dos valores obtidos nas três orientações dos laminados testadas.

Além do registado na Tabela 5.1, a comparação entre a técnica de reforço ao corte com laminados inseridos e a técnica da colagem externa de mantas foi estendida a outros valores de percentagem de

CFRP e de armadura transversal (Tabela 5.2). Os resultados obtidos demonstraram claramente que, independentemente da percentagem de estribos de aço e da percentagem de reforço de CFRP, os laminados inseridos proporcionaram um melhor desempenho das vigas reforçadas em termos de acréscimo de rigidez em serviço, de carga máxima na rotura e da flecha última na secção de aplicação da carga (para este último parâmetro a única excepção foi o caso apresentado na Tabela 5.1). Além disso, de um modo geral, registou-se um maior grau de mobilização do reforço de CFRP (extensões mais elevadas, pelo que maior desempenho do reforço) para as soluções com laminados.

Tabela 5.2 - Comparação do comportamento na rotura das vigas com NSM e as equivalentes EBR.

Parâmetros avaliados	Percentagem de CFRP*	NSM**		EBR	
		$\rho_{sw} = 0.10\%$	$\rho_{sw} = 0.17\%$	$\rho_{sw} = 0.10\%$	$\rho_{sw} = 0.17\%$
Carga máxima F_{max} [kN]	$\rho_{f,min}$	372.2	436.9	311.1	417.3
	$\rho_{f,med}$	396.7	454.4	325.1	423.0
	$\rho_{f,max}$	418.9	-	370.1	-
Flecha na rotura $u_{F_{max}}$ [mm]	$\rho_{f,min}$	6.83	8.05	4.79	7.01
	$\rho_{f,med}$	7.66	8.44	5.99	7.53
	$\rho_{f,max}$	6.43	-	7.77	-
Extensão máxima registada nos extensómetros colados no CFRP [%]	$\rho_{f,min}$	8.7	8.0	7.9	10.1
	$\rho_{f,med}$	8.7	8.7	6.8	5.8
	$\rho_{f,max}$	7.8	-	4.9	-

* $\rho_{f,min}$, $\rho_{f,med}$, $\rho_{f,max}$ dizem respeito, respectivamente, à menor, à intermédia e à maior percentagem de CFRP das vigas da série B. $\rho_{f,min} = 0.07-0.08\%$ (NSM) e 0.07% (EBR); $\rho_{f,med} = 0.11-0.13\%$ (NSM) e 0.10% (EBR); $\rho_{f,max} = 0.16-0.19\%$ (NSM) e 0.21% (EBR). ** Os valores apresentados dizem respeito à média dos valores obtidos: nas três orientações dos laminados testadas para $\rho_{sw} = 0.10\%$; nas duas orientações dos laminados testadas para $\rho_{sw} = 0.17\%$.

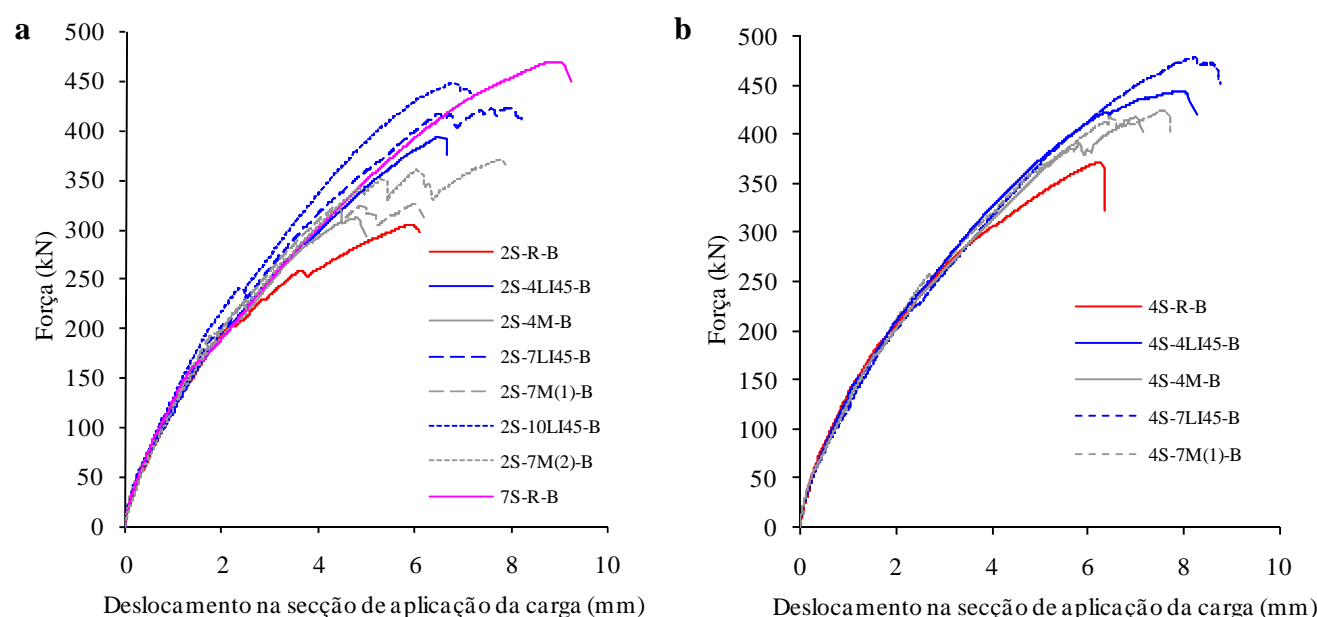


Figura 5.4 - Comparação de três formas diferentes de aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado (ver Tabela 4.7 e Figura 4.24 para identificar os modelos apresentados).

Nas curvas de comportamento carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga apresentadas na Figura 5.4 podem-se observar algumas das considerações que se acabam de expor. Na Figura 5.4-a é possível comparar o comportamento de vigas reforçadas com laminados inseridos (três percentagens de CFRP, tendo sido escolhida a orientação a 45°) com as “equivalentes” vigas reforçadas por colagem externa de mantas (viga 2S-4LI45-B vs viga 2S-4M-B; viga 2S-7LI45-B vs viga 2S-7M(1)-B; viga 2S-10LI45-B vs viga 2S-7M(2)-B). Além disso, na mesma figura é apresentado o comportamento de três vigas com capacidade de carga máxima prevista semelhante, que se diferenciavam pela forma como foi incrementada a resistência ao esforço transversal (estribos de aço: viga 7S-R-B; laminados inseridos: viga 2S-10LI45-B; e mantas coladas externamente: viga 2S-7M(2)-B). As vigas reforçadas com CFRP, cujo comportamento está ilustrado na Figura 5.4-a, tinham uma percentagem de armadura transversal ρ_{sw} igual a 0.10%. Na Figura 5.4-b ilustra-se o comportamento de vigas reforçadas com CFRP, laminados e respectivas soluções equivalentes em termos de manta, contendo ρ_{sw} igual a 0.17% (viga 4S-4LI45-B vs viga 4S-4M-B; viga 4S-7LI45-B vs viga 4S-7M(1)-B). Na Figura 5.4-a a viga de referência sem CFRP é a 2S-R-B ($\rho_{sw} = 0.10\%$) e na Figura 5.4-b é a 4S-R-B ($\rho_{sw} = 0.17\%$).

5.3 - MODOS DE ROTURA DAS VIGAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS AO CORTE COM LAMINADOS INSERIDOS

Os modos de rotura que ocorreram nas vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos foram condicionados pelo tipo de betão. No programa experimental apresentado no Capítulo 4 foram, fundamentalmente, utilizados três tipos de betão: um de classe de resistência baixa ($f_{cm} = 18.6$ MPa), um de classe de resistência média ($f_{cm} = 31.1/39.7$ MPa) e um de classe de resistência elevada ($f_{cm} = 59.4$ MPa). Nas vigas em betão de classe de resistência média, o modo de rotura que tipicamente ocorreu foi a cedência do reforço com destacamento de um volume de betão adjacente ao CFRP. Assim, ao diminuir a classe de resistência ($f_{cm} = 31.1/39.7$ MPa para $f_{cm} = 18.6$ MPa) a cedência dos reforços de CFRP continuou a ser condicionada pelo betão mas, pelo facto deste ser mais fraco, a rotura das vigas ocorreu mais prematuramente do que no caso das vigas com o betão de resistência intermédia. Se a cedência do CFRP ocorrer mais prematuramente, então o rendimento do CFRP será menor e, conseqüentemente, menor será o desempenho estrutural das vigas reforçadas.

Opostamente ao cenário anteriormente analisado, a passagem de um betão de classe de resistência intermédia ($f_{cm} = 31.1/39.7$ MPa) para um betão de classe de resistência elevada ($f_{cm} = 59.4$ MPa) alterou substancialmente o modo de rotura das vigas. O elemento condicionante da cedência do CFRP deixou de ser o betão e passou a ser a ligação adesivo-CFRP (escorregamento do laminado) ou até

mesmo a resistência à tracção do CFRP (rotura do laminado). Estas formas de cedência (“retardamento” da rotura das vigas) proporcionaram, relativamente às ocorridas no caso dos betões mais fracos, aumentos consideráveis no rendimento do reforço de CFRP e no desempenho estrutural das vigas reforçadas.

Face ao exposto, para betões de resistência elevada as propriedades mecânicas do CFRP podem ser solicitadas na sua plenitude, nomeadamente, a resistência máxima à tracção. Neste contexto, refira-se que, apesar do nível de mobilização do CFRP aumentar com a qualidade do betão, foram registadas extensões consideráveis nos laminados mesmo no caso das vigas construídas com o betão mais fraco das séries ensaiadas. Na Tabela 5.3 apresenta-se, resumidamente, a gama de valores da extensão máxima registada nas vigas das quatro séries ensaiadas, e que traduzem o grau de mobilização do reforço de CFRP usando a técnica da inserção de laminados. No âmbito da análise do grau de mobilização do reforço ao corte, importa referir um aspecto crucial que foi registado nos ensaios efectuados e que se relaciona com o facto das armaduras transversais atravessadas pela fenda de rotura de corte estarem em cedência na altura em que as vigas atingiram a sua capacidade de carga máxima.

Tabela 5.3 - Valores máximos das extensões registadas nos laminados de CFRP instrumentados.

Grau de mobilização do CFRP	Série A ($f_{cm} = 31.1$ MPa)	Série B* ($f_{cm} = 39.7$ MPa)	Série C* ($f_{cm} = 18.6$ MPa)	Série D** ($f_{cm} = 59.4$ MPa)
Valor médio da extensão máxima registada nos extensómetros colados no CFRP [%]	8.5	8.3	7.2	10.7 (11.6)***
Extensão máxima registada nos extensómetros colados no CFRP [%]	11.1	10.8	9.4	15.0 (15.0)***

* Séries em que foram testadas duas percentagens de armadura transversal: a mesma que a da série A ($\rho_{sw} = 0.10\%$) e $\rho_{sw} = 0.17\%$.

** Série em que foram testadas duas percentagens de armadura transversal: a mesma que a da série A ($\rho_{sw} = 0.10\%$) e $\rho_{sw} = 0.16\%$.

*** Os valores entre parênteses também consideram os registos nas vigas com pré-fendilhação do betão antes da aplicação do reforço de CFRP.

Ao contrário do que se verificou nas vigas reforçadas com mantas de CFRP coladas externamente, no caso do reforço com laminados inseridos os modos de rotura das vigas foram condicionados pela percentagem de CFRP, ou seja, pela distância entre laminados consecutivos. Concretamente, a proximidade entre laminados, por efeito de grupo, pode originar um modo de rotura caracterizado pelo destacamento de uma parede de “betão mais CFRP”, ou seja, um modo de rotura em que não se verifica a cedência individual dos laminados atravessados pelas fendas de rotura de corte. Desta forma, a aplicação de elevadas percentagens de CFRP pode originar uma penalização na rentabilidade do reforço. Refira-se que todas estas constatações vêm ao encontro do observado nos ensaios de aderência realizados por Rashid *et al.* (2008) e que foram apresentados no Capítulo 2 desta dissertação.

De um modo geral, verificou-se que para pequenas percentagens de CFRP a fenda de rotura de corte atravessa um reduzido número de laminados aos quais podem estar associados consideráveis comprimentos de aderência. Nestes casos, a rotura acabou por ocorrer pela cedência de um dos laminados atravessados pela mencionada fenda de rotura. A forma como se deu a cedência do CFRP dependeu do tipo de betão e do comprimento de aderência do laminado. Para esta gama de percentagens de CFRP, a cedência de um dos laminados acabou por ser determinante na resistência final da viga. De facto, a carga que esta atingiu, imediatamente antes da cedência do primeiro CFRP, não voltou a ser alcançada.

O padrão de fendilhação foi tão mais difuso quanto mais elevada era a percentagem de CFRP. A presença de mais fendas de corte a atravessar os CFRP conduziu a uma fragilização das condições de aderência do reforço, e à tendência de diminuição dos comprimentos de amarração dos laminados em contraposição com o verificado nas menores percentagens de reforço. Com a cedência do primeiro CFRP, e existindo uma proximidade entre laminados consecutivos, surgiram redistribuições de esforços pelos vários elementos resistentes ao esforço transversal (laminados e estribos de aço). Esta ocorrência fez com que, após a cedência de um laminado, se verificasse um dos seguintes cenários: i) uma momentânea quebra no aumento da capacidade de carga da viga e, posteriormente, esta conseguiu ainda alcançar uma carga superior à que originou a mencionada cedência do CFRP; ii) o nível de carregamento manteve-se praticamente constante para flechas bastante superiores àquela em que se verificaram as primeiras cedências do CFRP. Associada a esta ductilidade pode também estar a formação da parede de “betão mais CFRP” que foi anteriormente referida como modo de rotura característico das vigas com maiores percentagens de CFRP. Na Figura 5.5 ilustram-se as diferenças fundamentais no comportamento de vigas reforçadas com distinta percentagem de CFRP.

O modo de rotura registado nas vigas reforçadas com maiores percentagens de CFRP indicia que, para uma determinada solução de reforço ao corte, deve existir um limite mínimo para o espaçamento dos laminados, abaixo do qual não ocorre qualquer contributo em termos de capacidade resistente da viga. A melhor qualidade do betão potencia o retardar, ou mesmo o evitar, da ocorrência dos modos de rotura associados a percentagens elevadas de reforço (como exemplo, nas vigas da série D apenas numa se verificou o destacamento de uma parede “betão mais CFRP”). Pelo contrário, um betão fraco potencia a ocorrência dos referidos modos de rotura para menores percentagens de CFRP, o que leva a concluir que em soluções de reforço aplicadas a estruturas com betões de fraca resistência se deva evitar espaçamentos muito próximos para os laminados. Na Figura 5.6 ilustram-se os modos de rotura verificados em três vigas de séries diferentes (B, C e D) reforçadas com a mesma solução de CFRP (laminados inclinados a 45° e espaçados de 157 mm).

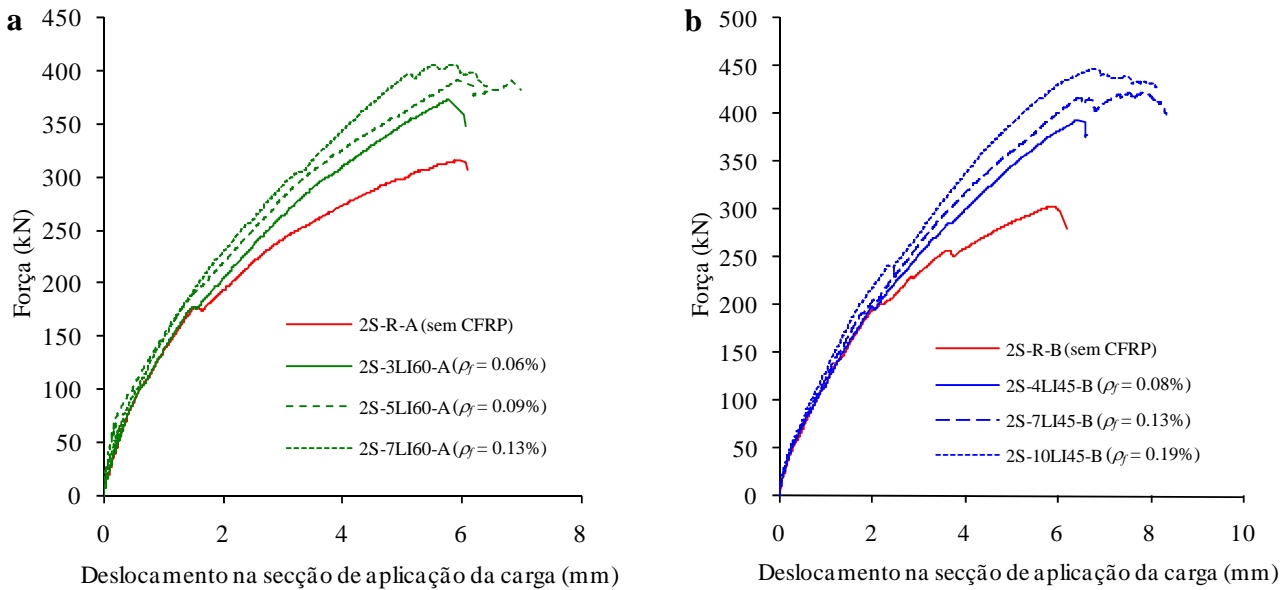


Figura 5.5 - Efeito da percentagem de CFRP: (a) três percentagens de reforço com laminados a 60°; (b) três percentagens de reforço com laminados a 45°.

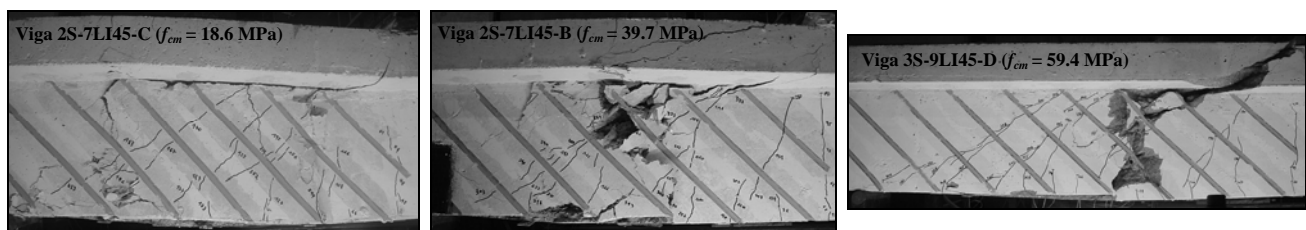


Figura 5.6 - Modos de rotura de vigas com a mesma solução de reforço, mas de betão de distinta classe de resistência.

Se a limitação do espaçamento mínimo para laminados consecutivos é importante, não é menos importante a questão do espaçamento máximo a adoptar. Uma solução de reforço com uma pequena percentagem de laminados deve garantir que o CFRP seja atravessado pela fenda de rotura de corte. Na Figura 5.7 apresenta-se um cenário a evitar (cenário A) e um cenário que deve ser garantido (cenário B). Além da imposição da existência de um número mínimo de laminados a atravessar a fenda de rotura de corte, a colocação do CFRP, em função da posição dos estribos de aço, deve ser outro aspecto a ser considerado de forma a ser obtida a distribuição o mais homogênea possível dos elementos resistentes ao esforço transversal (laminados de CFRP e estribos de aço).

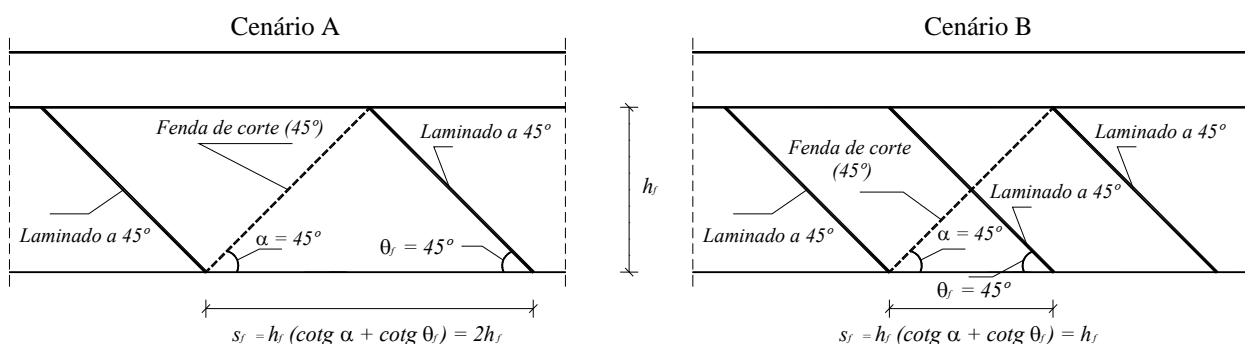


Figura 5.7 - Distância mínima entre laminados a colocar numa solução de reforço ao corte com CFRP.

As considerações gerais que se acabam de efectuar, em relação aos modos de rotura observados nas vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos, serão tidas em conta na análise que será feita na secção seguinte, onde se avaliará o efeito de cada um dos seguintes parâmetros no desempenho estrutural das vigas reforçadas: classe de resistência do betão, orientação e percentagem do CFRP, percentagem de armadura transversal, relação a/d .

5.4 - EFEITO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA DO BETÃO, DA ORIENTAÇÃO E PERCENTAGEM DO CFRP, DA PERCENTAGEM DE ARMADURA TRANSVERSAL E DA RELAÇÃO A/D

A avaliação do efeito dos parâmetros anteriormente mencionados no desempenho da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP vai ser efectuada tendo como horizonte a formulação analítica que será desenvolvida no Capítulo 6. De acordo com o que já foi descrito, a referida formulação terá como base os resultados experimentais do Capítulo 4 e será centrada na definição de uma equação que permitirá avançar com a extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) expectável para uma determinada solução de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos.

Em face do exposto, nesta fase torna-se necessário proceder à quantificação, para cada uma das vigas ensaiadas e que continham laminados, dos valores da contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f), bem como da respectiva extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}).

5.4.1 - Contribuição dos laminados de CFRP na resistência ao esforço transversal e extensão efectiva do CFRP

O valor da resistência ao esforço transversal de cada uma das vigas ensaiadas (V_{total}) foi quantificado a partir do respectivo valor da força máxima registada no ensaio (F_{max}). Tendo em conta o modelo estrutural das vigas, para o caso das séries A, B e C (ver Figuras 4.4, 4.24 e 4.52) o valor de V_{total} foi obtido por:

$$V_{total} = 0.6F_{max} \quad (5.1)$$

enquanto que para as vigas da série D o valor de V_{total} foi obtido por (ver Figura 4.66):

$$V_{total} = 0.5F_{max} \quad (5.2)$$

Tomando em consideração a equação (3.3), o valor da resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado reforçada ao corte com CFRP resulta do somatório da contribuição do betão (V_c),

dos estribos de aço (V_s) e do CFRP (V_f). Se para o caso das vigas de referência sem reforço de CFRP, a resistência ao esforço transversal for designada por V_{ref} , obtida usando as equações (5.1) e (5.2) conforme a série de vigas, e que engloba as parcelas V_c e V_s , tem-se:

$$V_{total} = V_{ref} + V_f \quad (5.3)$$

De acordo com o que se acabou de referir, a consideração do valor de V_{ref} na equação (5.3) implica, desde logo, que a contribuição da armadura transversal na resistência ao esforço transversal no caso da viga com CFRP seja igual à verificada na viga sem CFRP. A análise das várias vigas ensaiadas, que continham reforço de CFRP inserido, permite verificar que existem casos em que a premissa, anteriormente indicada, não se verificou, ou seja, existem situações em que há diferenças no nível de mobilização da armadura transversal que ocorreu nas vigas reforçadas quando comparado com o registado na viga sem CFRP.

Na Figura 5.8 apresentam-se duas vigas com CFRP (2S-5LI45-A e 2S-8LI45-A) em que a contribuição da armadura transversal na resistência ao esforço transversal é menor que a verificada na viga sem CFRP (2S-R-A). Nesta figura é possível constatar que, no caso da viga sem CFRP, os dois estribos de aço que foram colocados no vão de corte onde se deu a rotura da viga foram efectivos na resistência ao corte. De facto, o estribo da esquerda atravessou a fenda diagonal numa secção próximo do nível da armadura longitudinal e o da direita numa secção próxima da ligação alma-banzo. No caso da viga 2S-5LI45-A a fenda diagonal de corte atravessou um único estribo (o da esquerda) numa secção posicionada a meio da altura da alma da viga. O outro estribo (mais próximo do apoio) foi intersectado numa fase de desenvolvimento que a referida fenda de corte apresenta após ter intersectado o banzo da viga. Em face disto, é razoável considerar que o nível de mobilização deste último estribo, na altura em que a viga com CFRP atingiu a sua capacidade máxima, foi inferior ao que o estribo colocado na mesma posição na viga sem CFRP atingiu quando esta alcançou a sua capacidade resistente máxima. Um cenário semelhante ao da viga 2S-5LI45-A pode ser observado na viga 2S-8LI45-A. No entanto, neste último caso, pelo facto da secção onde a fenda de corte, que motivou o início do destacamento do CFRP (após a viga ter atingido a carga máxima), interceptou o banzo estar bastante afastada do estribo mais próximo da secção solicitada pela carga (o da direita) indicia uma contribuição marginal deste estribo para a abertura e propagação da fenda de rotura de corte. Na série A de vigas ensaiadas, cenários do género da viga 2S-5LI45-A (um estribo activo e outro parcial) foram observados nas vigas 2S-3LV-A, 2S-5LV-A, 2S-8LV-A, 2S-5LI60-A e 2S-7LI60-A. Além disso, um cenário do género da viga 2S-8LI45-A foi observado na viga 2S-3LI45-A.

O que se acaba de expor justifica, para os modelos de vigas mencionados, a necessidade de se introduzir uma correcção ao valor de V_{ref} , obtido directamente da viga de referência sem CFRP

(equação (5.3)). Para tal, será admitido que no cenário descrito para a viga 2S-5LI45-A exista um estribo a trabalhar a 100% e o outro a 50%, enquanto no cenário da viga 2S-8LI45-A apenas se considerará um estribo efectivo (100%). A contribuição de cada estribo na resistência ao esforço transversal é dada por:

$$V_s = A_{sw} \times f_{ym} \quad (5.4)$$

em que A_{sw} corresponde à área da secção transversal de dois varões de seis milímetros de diâmetro e f_{ym} é o valor médio da tensão de cedência do aço da armadura transversal.

Para o caso das vigas da série A ($f_{ym} = 533 \text{ MPa}$) o valor de V_s obtido da equação (5.4) corresponde a 30.1 kN. Desta forma, e face às considerações anteriormente efectuadas, o valor efectivo de V_{ref} das vigas 2S-5LI45-A, 2S-3LV-A, 2S-5LV-A, 2S-8LV-A, 2S-5LI60-A e 2S-7LI60-A será obtido deduzindo 15.1 kN ao valor de V_{ref} da viga 2S-R-A. Para as vigas 2S-8LI45-A e 2S-3LI45-A a referida dedução será de 30.1 kN.

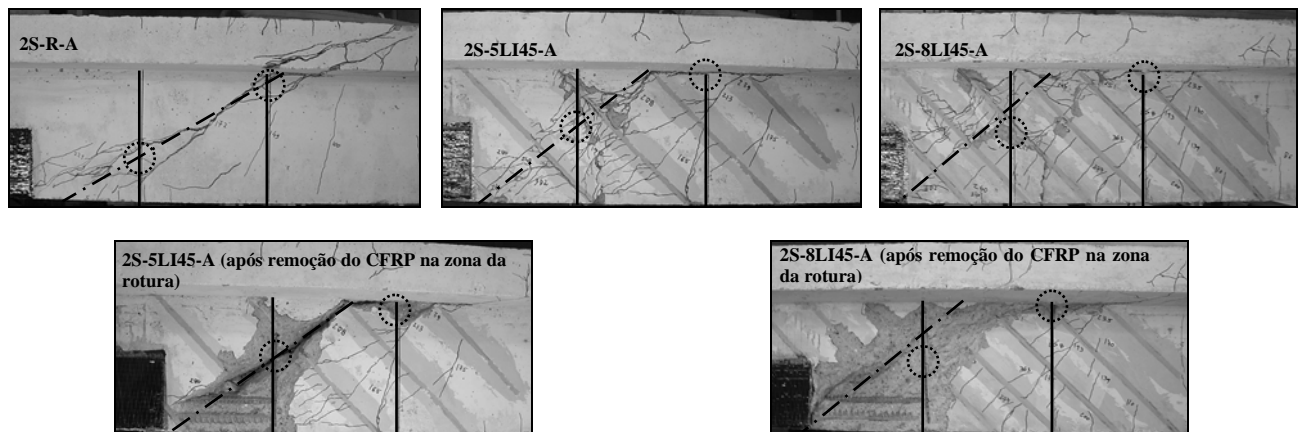


Figura 5.8 - Mobilização dos estribos de aço nas vigas 2S-R-A, 2S-5LI45-A e 2S-8LI45-A (nas vigas com CFRP a fenda diagonal alcança o banzo numa secção mais afastada do que o registado na viga sem CFRP).

Da análise das vigas da série B conclui-se que existem duas vigas reforçadas (2S-7LV-B e 2S-10LV-B) em que o nível de mobilização da armadura transversal foi inferior ao da respectiva viga sem CFRP (2S-R-B). Quer na viga 2S-7LV-B como na viga 2S-10LV-B, na altura em que atingiram a sua capacidade máxima resistente apenas existia um estribo a atravessar a fenda de rotura de corte (Figura 5.9). Atendendo a que o comportamento da viga 2S-R-B foi semelhante ao da viga 2S-5LI45-A (o estribo da esquerda foi atravessado pela fenda diagonal de corte enquanto o outro foi intersectado numa fase de desenvolvimento que a referida fenda de corte apresenta após ter intersectado o banzo da viga), o valor efectivo de V_{ref} das vigas 2S-7LV-B e 2S-10LV-B será obtido deduzindo ao valor de V_{ref} da viga 2S-R-B o valor de 15.3 kN (50% do valor de V_s correspondente um estribo - equação (5.4) em que a tensão de cedência do aço da armadura transversal da série B foi de 542 MPa).

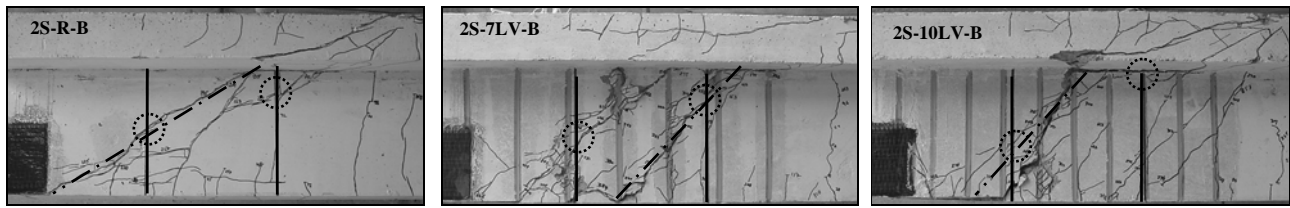


Figura 5.9 - Mobilização dos estribos de aço nas vigas 2S-R-B, 2S-7LV-B e 2S-10LV-B.



Figura 5.10 - Mobilização dos estribos de aço nas vigas 2S-R-C e 2S-7LV-C.

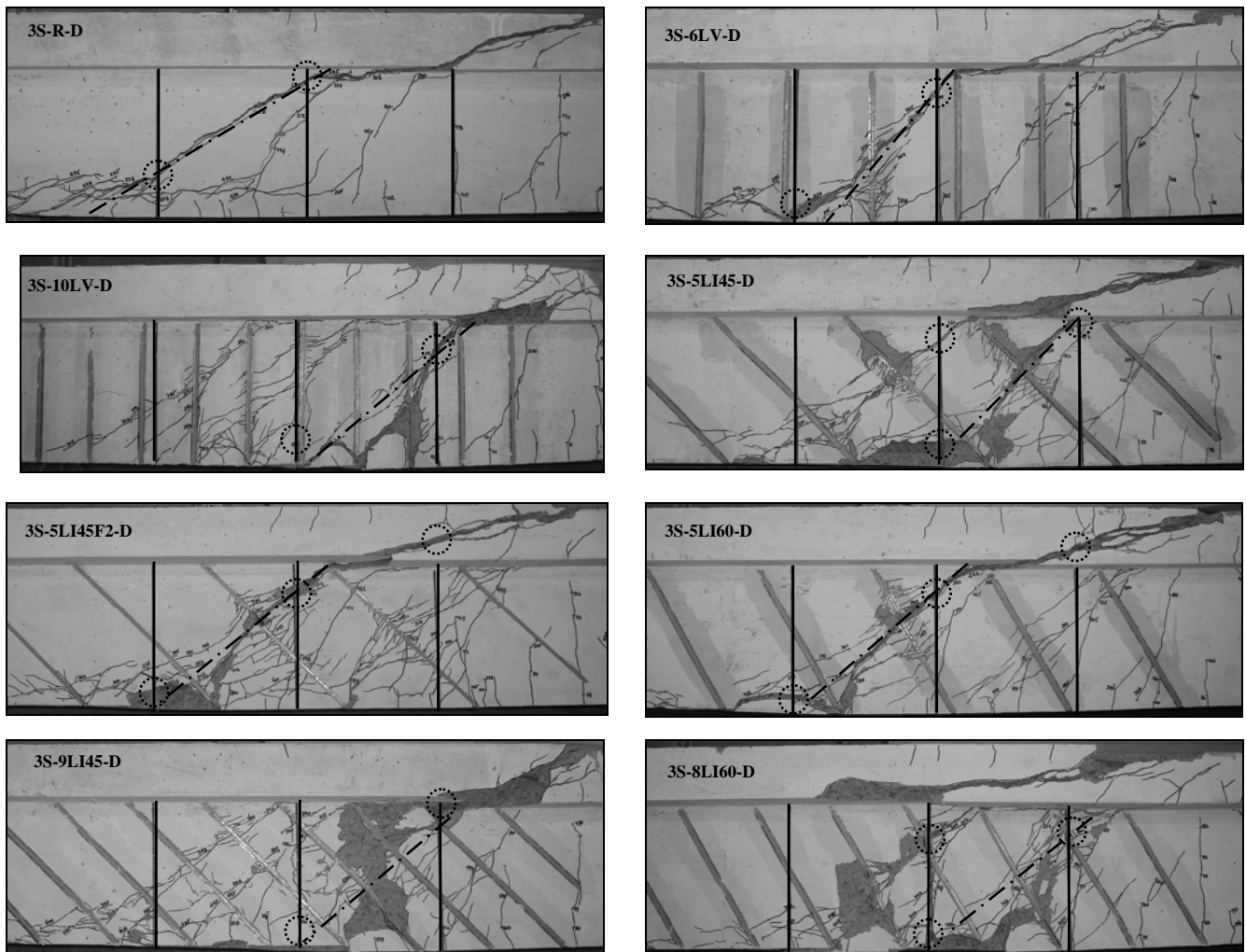


Figura 5.11 - Mobilização dos estribos de aço nas vigas 3S-R-D, 3S-6LV-D, 3S-10LV-D, 3S-5LI45-D, 3S-5LI45F2-D, 3S-5LI60-D, 3S-9LI45-D e 3S-8LI60-D.

No que diz respeito à série C, a viga 2S-7LV-C registou um comportamento, ao nível da mobilização da armadura transversal na altura em que atingiu a sua capacidade de carga máxima, diferente do registado na viga de referência sem CFRP (2S-R-C). Na Figura 5.10 estão ilustradas essas diferenças. Neste contexto, o comportamento da viga 2S-R-C foi semelhante ao da viga 2S-R-B e o da viga 2S-

7LV-C foi semelhante ao das vigas 2S-7LV-B e 2S-10LV-B. Assim sendo, o valor efectivo de V_{ref} da viga 2S-7LV-C foi obtido deduzindo ao valor de V_{ref} da viga 2S-R-C o valor de 15.3 kN (50% do valor de V_s correspondente um estribo - equação (5.4) em que a tensão de cedência do aço da armadura transversal da série C foi de 539 MPa).

A viga de referência 3S-R-D (série D) no momento em que alcançou a sua capacidade de carga máxima tinha dois estribos de aço a atravessar a fenda diagonal de corte que teve na origem da sua rotura. Este cenário não se verificou na viga 3S-6LV-D, onde apenas se registou a presença de um estribo de aço a fazer face à fenda que originou o esgotamento da sua capacidade máxima de carga (Figura 5.11). No caso das vigas 3S-10LV-D, 3S-5LI45-D, 3S-5LI45F2-D, 3S-5LI60-D, 3S-9LI45-D e 3S-8LI60-D houve também um menor desempenho da armadura transversal no momento em que estas vigas alcançaram a carga máxima, quando comparado com o desempenho da armadura transversal na viga de referência (3S-R-D). No entanto, nestes casos é aceitável considerar uma comparticipação parcial do segundo estribo (Figura 5.11). Desta forma, em face do que se acaba de expor, o valor efectivo de V_{ref} das vigas 3S-10LV-D, 3S-5LI45-D, 3S-5LI45F2-D, 3S-5LI60-D, 3S-9LI45-D e 3S-8LI60-D será obtido deduzindo ao valor de V_{ref} da viga 3S-R-D o valor de 15.6 kN (50% do valor de V_s correspondente um estribo - equação (5.4) em que a tensão de cedência do aço da armadura transversal da série D foi de 551 MPa). Para a viga 3S-6LV-D a referida dedução será de 31.2 kN.

Uma vez determinada a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f), é possível avançar para a quantificação da respectiva extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}). De acordo com a equação (5.5), o valor da força total mobilizada no reforço de CFRP (F_f), atravessado pela fenda de rotura de corte, é obtido multiplicando o número de laminados (n_f) que a atravessam, pela resistência conferida por cada par de CFRP. Esta, resulta do produto do valor da área de reforço ao corte (A_{fv}), que é igual a duas vezes o valor da área da secção transversal do laminado ($A_{fv} = 2 \times a_f \times b_f$), pela tensão efectiva do CFRP (f_{fe}).

$$F_f = n_f \times A_{fv} \times f_{fe} \quad (5.5)$$

O número de laminados atravessados pela fenda de rotura de corte (ver Figura 5.12) é dado por (5.6). Nesta equação h_w é a altura da alma da viga (igual ao comprimento do laminado no caso do CFRP vertical), α é a inclinação da fenda de rotura de corte e θ_f e s_f representam, respectivamente, o ângulo que as fibras do CFRP fazem com o eixo longitudinal da viga e o espaçamento entre laminados consecutivos.

$$n_f = \frac{h_w \times (\cot g \alpha + \cot g \theta_f)}{s_f} \quad (5.6)$$

Uma vez alcançado o valor da força F_f , a resistência ao esforço transverso de uma determinada solução de reforço ao corte de CFRP (V_f) é obtida pela seguinte equação:

$$V_f = F_f \times \sin \theta_f \quad (5.7)$$

Tendo em conta as equações (5.5) e (5.6), e o facto da tensão efectiva do CFRP (f_{fe}) ser obtida pelo produto do seu módulo de elasticidade, E_f , pela extensão efectiva ε_{fe} ($f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{fe}$), a equação (5.7) toma o seguinte formato:

$$V_f = h_w \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times \varepsilon_{fe} \times E_f \times (\cot g \alpha + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f \quad (5.8)$$

da qual resulta a expressão analítica que permite obter o valor da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) para cada solução de reforço ao corte testada, uma vez conhecido o respectivo valor de V_f :

$$\varepsilon_{fe} = V_f / \left(h_w \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times E_f \times (\cot g \alpha + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f \right) \quad (5.9)$$

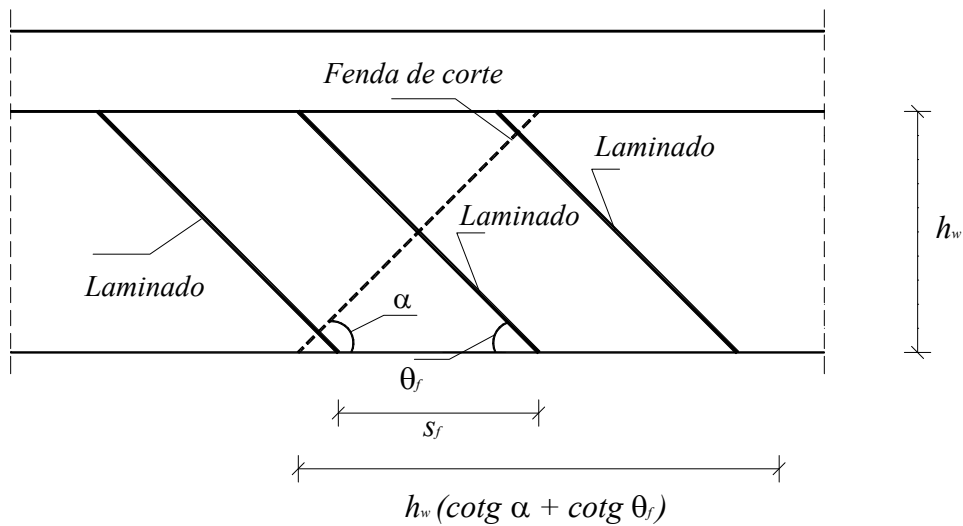


Figura 5.12 - Dados para a determinação analítica da extensão efectiva do CFRP.

Na Tabela 5.4, para cada uma das vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP ensaiadas no âmbito do programa experimental descrito no Capítulo 4, apresentam-se os parâmetros principais que a caracterizam, cujo significado já foi devidamente exposto ao longo da dissertação, e os valores da força máxima (F_{max}), da resistência ao esforço transverso total (V_{total} - equação (5.1) ou (5.2)), da contribuição dos laminados de CFRP na resistência ao esforço transverso (V_f - equação (5.3)) e da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}).

Tabela 5.4 - Dados para a análise geral dos resultados do programa experimental do Capítulo 4.

Vigas	f_{cm} [MPa]	ρ_f [%]	E_f [GPa]	ε_{fu} [‰]	θ_f [°]	ρ_{sw} [%]	ρ_{sl} [%]	a/d	s_f [mm]	$a_f \times b_f$ [mm ²]	F_{max} [kN]	V_{total} [kN]	V_f [kN]	V_f [kN]	ε_{fe} [‰]
2S-3LV-A	31.1	0.06	166.6	17.7	90	0.10	2.9	2.5	267	14.0	316.0	189.6	0.6	15.7	2.99
2S-5LV-A	31.1	0.10	166.6	17.7	90	0.10	2.9	2.5	160	14.0	357.0	214.2	25.2	40.3	4.60
2S-8LV-A	31.1	0.16	166.6	17.7	90	0.10	2.9	2.5	100	14.0	396.0	237.6	48.6	63.7	4.55
2S-3LI45-A	31.1	0.06	166.6	17.7	45	0.10	2.9	2.5	367	14.0	328.0	196.8	7.8	37.9	7.04
2S-5LI45-A	31.1	0.10	166.6	17.7	45	0.10	2.9	2.5	220	14.0	384.0	230.4	41.4	56.5	6.28
2S-8LI45-A	31.1	0.16	166.6	17.7	45	0.10	2.9	2.5	138	14.0	382.0	229.2	40.2	70.3	4.90
2S-3LI60-A	31.1	0.06	166.6	17.7	60	0.10	2.9	2.5	325	14.0	374.0	224.4	35.4	35.4	6.02
2S-5LI60-A	31.1	0.09	166.6	17.7	60	0.10	2.9	2.5	195	14.0	392.0	235.2	46.2	61.3	6.25
2S-7LI60-A	31.1	0.13	166.6	17.7	60	0.10	2.9	2.5	139	14.0	406.0	243.6	54.6	69.7	5.07
2S-4LV-B	39.7	0.08	170.9	16.0	90	0.10	2.8	2.5	180	13.3	337.4	202.4	20.2	20.2	2.66
2S-7LV-B	39.7	0.13	170.9	16.0	90	0.10	2.8	2.5	114	13.3	374.1	224.5	42.2	57.5	4.81
2S-10LV-B	39.7	0.18	170.9	16.0	90	0.10	2.8	2.5	80	13.3	397.5	238.5	56.2	71.5	4.20
2S-4LI45-B	39.7	0.08	170.9	16.0	45	0.10	2.8	2.5	275	13.3	392.8	235.7	53.4	53.4	7.61
2S-7LI45-B	39.7	0.13	170.9	16.0	45	0.10	2.8	2.5	157	13.3	421.7	253.0	70.7	70.7	5.76
2S-10LI45-B	39.7	0.19	170.9	16.0	45	0.10	2.8	2.5	110	13.3	446.5	267.9	85.6	85.6	4.88
2S-4LI60-B	39.7	0.07	170.9	16.0	60	0.10	2.8	2.5	243	13.3	386.4	231.8	49.6	49.6	6.46
2S-6LI60-B	39.7	0.11	170.9	16.0	60	0.10	2.8	2.5	162	13.3	394.4	236.6	54.4	54.4	4.73
2S-9LI60-B	39.7	0.16	170.9	16.0	60	0.10	2.8	2.5	108	13.3	412.7	247.6	65.3	65.3	3.79
4S-4LV-B	39.7	0.08	170.9	16.0	90	0.17	2.8	2.5	180	13.3	424.5	254.7	31.9	31.9	4.21
4S-4LVa-B	39.7	0.08	170.9	16.0	90	0.17	2.8	2.5	180	13.3	439.2	263.5	40.7	40.7	5.37
4S-7LV-B	39.7	0.13	170.9	16.0	90	0.17	2.8	2.5	114	13.3	427.4	256.4	33.6	33.6	2.81
4S-4LI45-B	39.7	0.08	170.9	16.0	45	0.17	2.8	2.5	275	13.3	442.5	265.5	42.7	42.7	6.08
4S-7LI45-B	39.7	0.13	170.9	16.0	45	0.17	2.8	2.5	157	13.3	478.1	286.9	64.0	64.0	5.21
4S-4LI60-B	39.7	0.07	170.9	16.0	60	0.17	2.8	2.5	243	13.3	443.9	266.3	43.5	43.5	5.67
4S-6LI60-B	39.7	0.11	170.9	16.0	60	0.17	2.8	2.5	162	13.3	457.6	274.6	51.7	51.7	4.50
2S-7LV-C	18.6	0.13	174.3	16.3	90	0.10	2.8	2.5	114	13.3	273.7	164.2	28.3	43.6	3.57
2S-4LI45-C	18.6	0.08	174.3	16.3	45	0.10	2.8	2.5	275	13.3	283.0	169.8	33.9	33.9	4.74
2S-7LI45-C	18.6	0.13	174.3	16.3	45	0.10	2.8	2.5	157	13.3	306.5	183.9	48.0	48.0	3.83
2S-4LI60-C	18.6	0.07	174.3	16.3	60	0.10	2.8	2.5	243	13.3	281.6	169.0	33.1	33.1	4.23
2S-6LI60-C	18.6	0.11	174.3	16.3	60	0.10	2.8	2.5	162	13.3	297.7	178.6	42.7	42.7	3.64
4S-7LV-C	18.6	0.13	174.3	16.3	90	0.17	2.8	2.5	114	13.3	315.2	189.1	6.8	6.8	0.56
4S-4LI45-C	18.6	0.08	174.3	16.3	45	0.17	2.8	2.5	275	13.3	347.2	208.3	26.0	26.0	3.64
4S-7LI45-C	18.6	0.13	174.3	16.3	45	0.17	2.8	2.5	157	13.3	356.4	213.8	31.6	31.6	2.52
4S-4LI60-C	18.6	0.07	174.3	16.3	60	0.17	2.8	2.5	243	13.3	345.6	207.4	25.1	25.1	3.21
4S-6LI60-C	18.6	0.11	174.3	16.3	60	0.17	2.8	2.5	162	13.3	362.3	217.4	35.1	35.1	2.99
3S-6LV-D	59.4	0.08	174.3	16.3	90	0.10	3.1	3.3	180	13.3	387.0	193.5	13.6	44.7	5.79
3S-10LV-D	59.4	0.13	174.3	16.3	90	0.10	3.1	3.3	114	13.3	491.7	245.9	65.9	81.5	6.68
3S-5LI45-D	59.4	0.08	174.3	16.3	45	0.10	3.1	3.3	275	13.3	492.1	246.1	66.1	81.7	11.42
3S-9LI45-D	59.4	0.13	174.3	16.3	45	0.10	3.1	3.3	157	13.3	563.6	281.8	101.9	117.4	9.37
3S-5LI60-D	59.4	0.07	174.3	16.3	60	0.10	3.1	3.3	243	13.3	497.9	249.0	69.0	84.6	10.82
3S-8LI60-D	59.4	0.11	174.3	16.3	60	0.10	3.1	3.3	162	13.3	584.5	292.3	112.3	127.9	10.90
3S-5LI45F1-D	59.4	0.08	174.3	16.3	45	0.10	3.1	3.3	275	13.3	531.4	265.7	85.8	85.8	11.99
3S-5LI45F2-D	59.4	0.08	174.3	16.3	45	0.10	3.1	3.3	275	13.3	490.6	245.3	65.4	80.9	11.31
5S-5LI45-D	59.4	0.08	174.3	16.3	45	0.16	3.1	3.3	275	13.3	559.5	279.8	74.9	74.9	10.47
5S-9LI45-D	59.4	0.13	174.3	16.3	45	0.16	3.1	3.3	157	13.3	627.5	313.8	108.9	108.9	8.69
5S-5LI60-D	59.4	0.07	174.3	16.3	60	0.16	3.1	3.3	243	13.3	556.4	278.2	73.4	73.4	9.38
5S-8LI60-D	59.4	0.11	174.3	16.3	60	0.16	3.1	3.3	162	13.3	654.6	327.3	122.5	122.5	10.44
5S-5LI45F-D	59.4	0.08	174.3	16.3	45	0.16	3.1	3.3	275	13.3	611.9	306.0	101.1	101.1	14.13
5S-5LI60F-D	59.4	0.07	174.3	16.3	60	0.16	3.1	3.3	243	13.3	554.8	277.4	72.6	72.6	9.28

* Valor de V_f considerando que o comportamento da armadura transversal nas vigas com CFRP é idêntico ao das vigas sem CFRP.** Valor de V_f tendo em conta uma análise comparativa entre o comportamento da armadura transversal nas vigas com CFRP e nas vigas sem CFRP.

Para a contribuição V_f , na Tabela 5.4, são apresentados dois valores correspondentes a dois cenários distintos para a sua quantificação: o que foi obtido da equação (5.3) considerando directamente para a contribuição V_{ref} o valor da resistência ao esforço transversal da viga não reforçada (cenário A); e o que foi obtido atendendo às considerações que foram efectuadas anteriormente no que diz respeito às diferenças existentes entre o grau de mobilização da armadura transversal das vigas com e sem CFRP (cenário B). As vigas que apresentam valores diferentes da contribuição V_f , em virtude de se utilizarem dois processos de a obter, estão diferenciadas na Tabela 5.4 com fundo cinzento no valor correspondente ao cenário B. A extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) apresentada na Tabela 5.4 foi obtida usando a equação (5.9) para os valores de V_f referentes ao cenário B e considerando que o valor da inclinação da fenda de rotura de corte, em relação ao eixo longitudinal da viga, era de 45° ($\alpha = 45^\circ$).

Nas secções seguintes será feita a análise relativa ao efeito de cada um dos seguintes parâmetros no desempenho estrutural das vigas reforçadas ao corte com laminados inseridos: classe de resistência do betão, orientação e percentagem do CFRP, percentagem de armadura transversal, relação a/d . De acordo com o que foi referido no início deste capítulo, esta análise será centrada nos valores obtidos para a contribuição dos laminados de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f) e da respectiva extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}). Os valores de V_f e ε_{fe} que serão utilizados nesta análise são os que foram obtidos utilizando o cenário B para o cálculo da contribuição V_f .

5.4.2 - Efeito da qualidade do betão

O desempenho de uma determinada solução de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos pode ser influenciado por vários factores, uns associados ao próprio CFRP e outros associados ao elemento estrutural onde o CFRP é inserido. Neste segundo grupo de factores destaca-se um que se refere à qualidade do betão. Ao longo do capítulo anterior e na análise geral dos modos de rotura efectuada na secção anterior já foram feitas considerações relativas a esta questão e que serão agora objecto de quantificação tendo em conta a base de resultados experimentais disponível.

Na Tabela 5.5 apresentam-se as cinco soluções de reforço de CFRP que foram aplicadas a vigas com três diferentes qualidades de betão (séries B, C e D). Das soluções anteriormente referidas, quatro (soluções 2, 3, 4 e 5) foram aplicadas quer a vigas com uma percentagem de armadura transversal igual a 0.10% ($\rho_{sw} = 0.10\%$), como a vigas com $\rho_{sw} = 0.16\%$ (vigas da série D) ou $\rho_{sw} = 0.17\%$ (vigas das séries B e C). Na Figura 5.13 apresenta-se, para cada solução de CFRP descrita na Tabela 5.5, os valores alcançados (Tabela 5.4) para a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f): o da coluna da esquerda refere-se à viga da série B, o da coluna central refere-se à

viga da série C e o da coluna da direita refere-se à viga da série D. A análise dos valores registados na Figura 5.13 confirma o facto de existir uma clara interferência da classe de resistência do betão na eficácia de uma determinada solução de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos. Em termos médios, os valores de V_f para o caso das vigas das séries B, C e D foram, respectivamente, 54.2 kN, 35.4 kN e 97.0 kN. Desta forma, tomando como base o valor médio de V_f das vigas da série C ($f_{cm} = 18.6$ MPa), verifica-se que os valores desta grandeza para as vigas da série B ($f_{cm} = 39.7$ MPa) e D ($f_{cm} = 59.4$ MPa) foram, respectivamente, 1.5 e 2.7 vezes superior. As diferenças observadas nos modos de rotura das três séries de vigas, que foram descritas na secção anterior, justificam a tendência para um aumento de V_f com o aumento de f_{cm} . Em termos de extensão efectiva no CFRP (ε_{fe} - determinada usando a equação (5.9); ver Tabela 5.4), e de acordo com os dados da Figura 5.14, o seu valor médio para as vigas das séries B, C e D foram, respectivamente, 5.6‰, 3.6‰ e 9.8‰.

Considerando os valores médios de V_f e ε_{fe} , anteriormente referidos, nas Figuras 5.13 e 5.14 apresentam-se as linhas de tendência das referidas grandezas em função da resistência do betão (f_{cm}). Constata-se que a variação de V_f e de ε_{fe} por incremento de f_{cm} é tão mais pronunciada quanto maior for a resistência do betão.

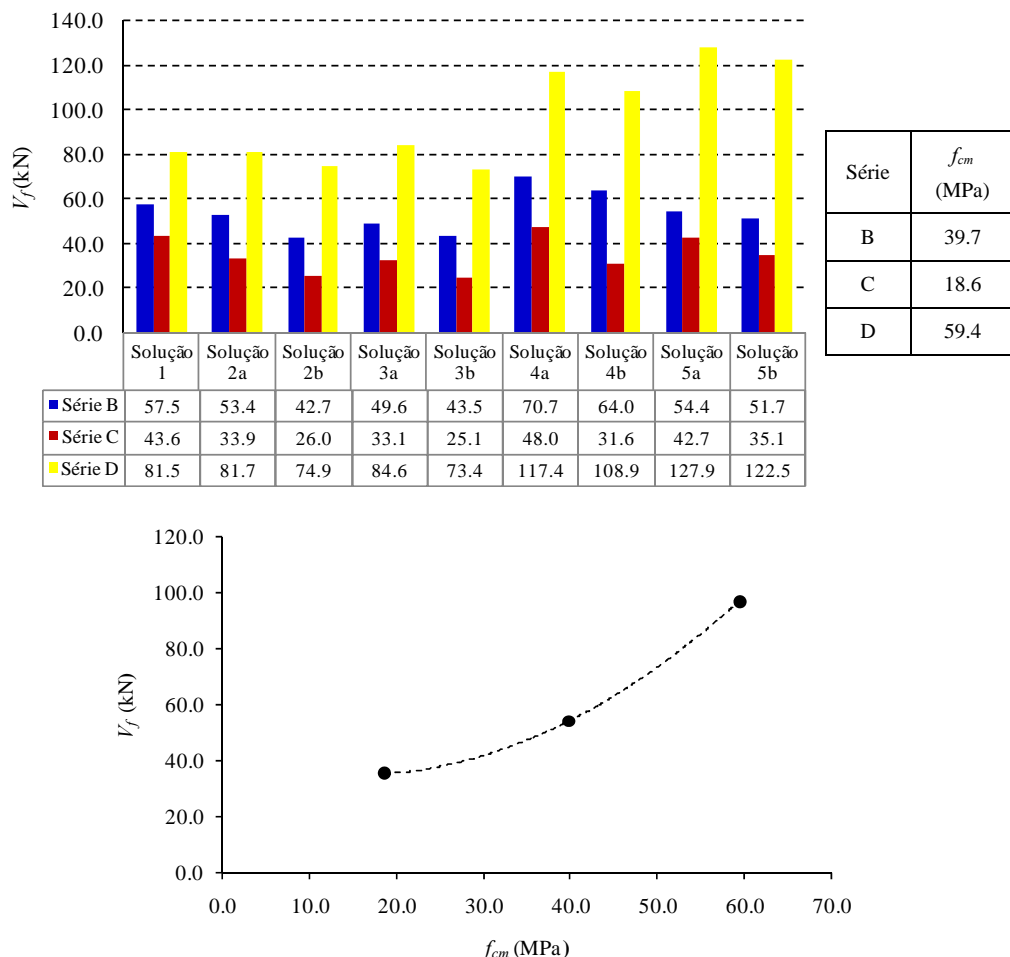
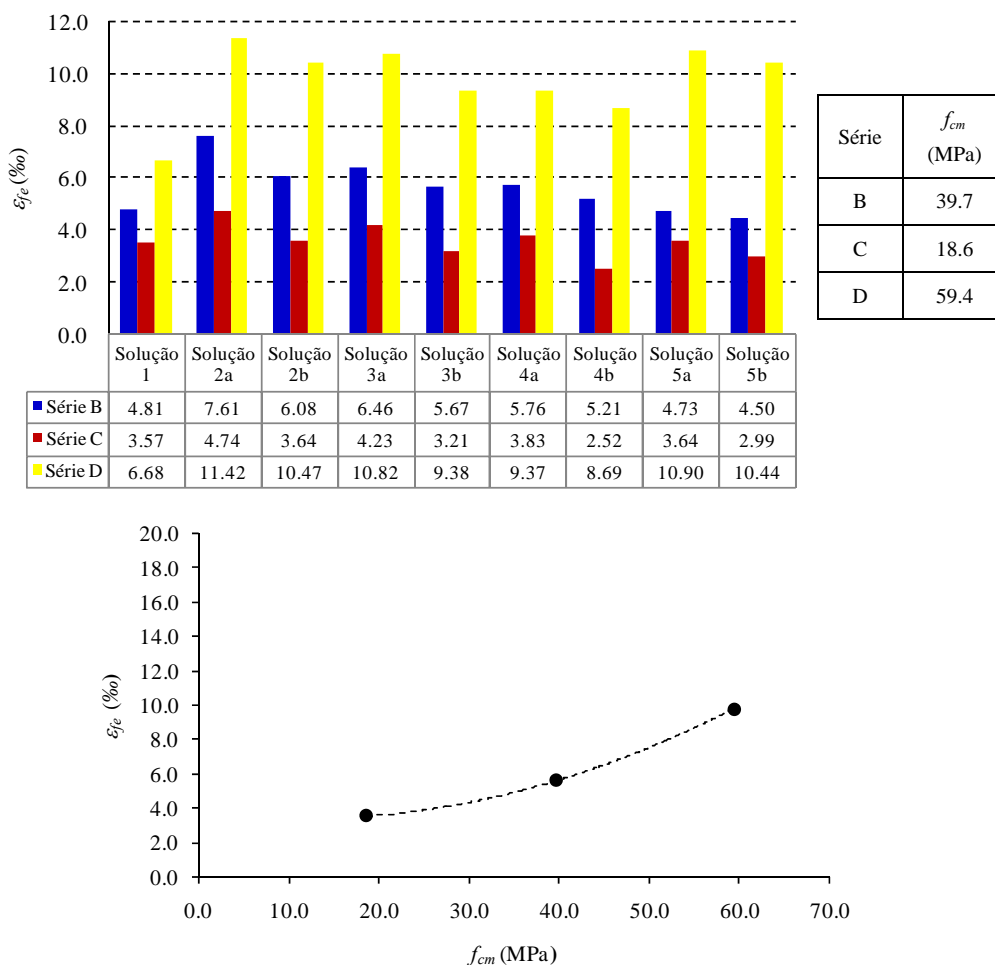


Figura 5.13 - Efeito do betão na eficácia de uma solução de reforço de CFRP em termos de V_f .

Tabela 5.5 - Soluções de reforço de CFRP aplicadas a três tipos de betão.

Solução de reforço*	ρ_{sw} [%]	ρ_f [%]	θ_f [°]	s_f [mm]	Vigas		
					Série B ($f_{cm} = 39.7$ MPa)	Série C ($f_{cm} = 18.6$ MPa)	Série D** ($f_{cm} = 59.4$ MPa)
Solução 1	0.10	0.13	90	114	2S-7LV-B	2S-7LV-C	3S-10LV-D
Solução 2a	0.10	0.08	45	275	2S-4LI45-B	2S-4LI45-C	3S-5LI45-D
Solução 2b	0.16 - 0.17	0.08	45	275	4S-4LI45-B	4S-4LI45-C	5S-5LI45-D
Solução 3a	0.10	0.07	60	243	2S-4LI60-B	2S-4LI60-C	3S-5LI60-D
Solução 3b	0.16 - 0.17	0.07	60	243	4S-4LI60-B	4S-4LI60-C	5S-5LI60-D
Solução 4a	0.10	0.13	45	157	2S-7LI45-B	2S-7LI45-C	3S-9LI45-D
Solução 4b	0.16 - 0.17	0.13	45	157	4S-7LI45-B	4S-7LI45-C	5S-9LI45-D
Solução 5a	0.10	0.11	60	162	2S-6LI60-B	2S-6LI60-C	3S-8LI60-D
Solução 5b	0.16 - 0.17	0.11	60	162	4S-6LI60-B	4S-6LI60-C	5S-8LI60-D

* A designação das soluções de reforço foi feita utilizando o seguinte critério (ver exemplo da solução 2): a letra a no final da designação (Solução 2a) quer dizer que o reforço foi aplicado ao menor valor de ρ_{sw} (0.10%) e a letra b no final da designação (Solução 2b) quer dizer que o reforço foi aplicado ao maior valor de ρ_{sw} (0.16% nas vigas da série D e 0.17% nas vigas das séries B e C). A solução de reforço 1 (Solução 1) apenas foi aplicada em vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$. ** As vigas da série D tinham uma relação $a/d = 3.3$ (para o caso das vigas das séries B e C esta relação era de 2.5).

Figura 5.14 - Efeito da resistência do betão na eficácia de uma solução de reforço de CFRP em termos de ϵ_{fe} .

5.4.3 - Efeito da percentagem de estribos de aço

Na Tabela 5.6 apresentam-se as soluções de reforço que foram aplicadas em vigas que se distinguíam apenas pela percentagem de armadura transversal que continham. Para cada uma destas soluções de CFRP, o valor de V_f obtido (Tabela 5.4), nas duas percentagens de estribos de aço testadas, encontra-se representado na Figura 5.15: a coluna da esquerda diz respeito à percentagem ρ_{sw} igual a 0.10%, e a da direita refere-se a, ρ_{sw} igual a 0.16% nas vigas da série D, e a ρ_{sw} igual a 0.17% nas vigas das séries B e C. Na Figura 5.16 encontra-se representado o mesmo tipo de análise em termos do valor da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe} - determinada usando a equação (5.9); ver Tabela 5.4).

Tabela 5.6 - Soluções de reforço de CFRP aplicadas a duas percentagens de estribos de aço.

Solução de reforço	ρ_f [%]	θ_f [°]	s_f [mm]	Série	Vigas	
					$\rho_{sw} = 0.10\%$	$\rho_{sw} = 0.16\%-0.17\%$ *
Solução 1	0.08	90	180	B	2S-4LV-B	4S-4LV-B
Solução 2	0.13	90	114	B	2S-7LV-B	4S-7LV-B
Solução 3	0.08	45	275	B	2S-4LI45-B	4S-4LI45-B
Solução 4	0.13	45	157	B	2S-7LI45-B	4S-7LI45-B
Solução 5	0.07	60	243	B	2S-4LI60-B	4S-4LI60-B
Solução 6	0.11	60	162	B	2S-6LI60-B	4S-6LI60-B
Solução 7	0.13	90	114	C	2S-7LV-C	4S-7LV-C
Solução 8	0.08	45	275	C	2S-4LI45-C	4S-4LI45-C
Solução 9	0.13	45	157	C	2S-7LI45-C	4S-7LI45-C
Solução 10	0.07	60	243	C	2S-4LI60-C	4S-4LI60-C
Solução 11	0.11	60	162	C	2S-6LI60-C	4S-6LI60-C
Solução 12	0.08	45	275	D	3S-5LI45-D	5S-5LI45-D
Solução 13	0.13	45	157	D	3S-9LI45-D	5S-9LI45-D
Solução 14	0.07	60	243	D	3S-5LI60-D	5S-5LI60-D
Solução 15	0.11	60	162	D	3S-8LI60-D	5S-8LI60-D

* O valor de $\rho_{sw} = 0.17\%$ diz respeito às vigas das séries B e C e o valor de $\rho_{sw} = 0.16\%$ diz respeito às vigas da série D.

Os dados das Figuras 5.15 e 5.16 demonstram algo, que também é evidente na análise das Figuras 5.13 e 5.14, e que já anteriormente foi mencionado: o desempenho da técnica de reforço ao corte com laminados inseridos é condicionada pela percentagem de armadura transversal, e a forma como esta influência se faz sentir depende do tipo de betão. Tendo como base de comparação a eficácia do reforço de CFRP quando aplicado com a menor percentagem de armadura transversal testada, verifica-se que, no caso das vigas de betão de menor resistência (série C com $f_{cm} = 18.6$ MPa), ao

aumentar o valor ρ_{sw} houve uma considerável diminuição do desempenho do CFRP. Esta diminuição de eficácia foi menos evidente nas vigas da série B ($f_{cm} = 39.7$ MPa) que foram fabricadas com um betão de maior resistência do que o das vigas da série C. Para o caso da série D ($f_{cm} = 59.4$ MPa) verificou-se que o desempenho das soluções de reforço foi ligeiramente superior nos casos em que foram aplicadas a vigas com o menor valor de ρ_{sw} .

A análise da Figura 5.15 (não foram consideradas as soluções 1 e 7 por se terem registado situações que se desviam muito do verificado nas restantes soluções) permite constatar que os reforços de CFRP, aplicados a vigas com uma percentagem de estribos de aço de 0.16%-0.17%, conduziram a valores de V_f igual a 75% (série C), 80% (série B) e 92% (série D) do obtido pelos mesmos reforços mas aplicados a vigas com uma percentagem de estribos de aço de 0.10%. O valor da extensão efectiva do CFRP (Figura 5.16) para o caso das vigas com ρ_{sw} igual 0.10% foi de 5.9‰, 4.0‰ e 10.6‰, respectivamente, para as séries B, C e D. Para a maior percentagem de estribos de aço a extensão efectiva média nas séries B, C e D foi 4.7‰, 3.1‰ e 9.7‰, respectivamente.

Na Figura 5.17 apresenta-se a influência do betão no papel desempenhado pela percentagem de estribos de aço na eficácia da técnica de reforço em análise. O parâmetro R representa, para cada tipo de betão, o quociente da relação entre o valor médio de V_f obtido nas vigas com a maior percentagem de armadura transversal e o valor médio de V_f obtido nas vigas com a menor percentagem de armadura transversal. Além dos três pontos referentes aos três tipos de betão testados foi introduzida uma linha de tendência da variação do parâmetro R em função do valor de f_{cm} .

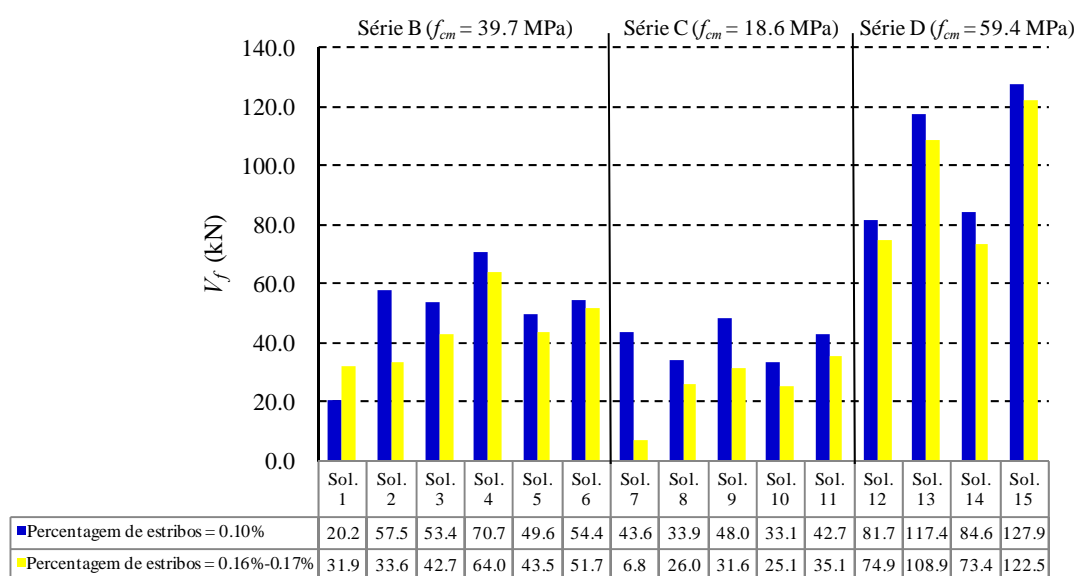


Figura 5.15 - Efeito da percentagem de estribos de aço na eficácia de uma solução de reforço de CFRP.

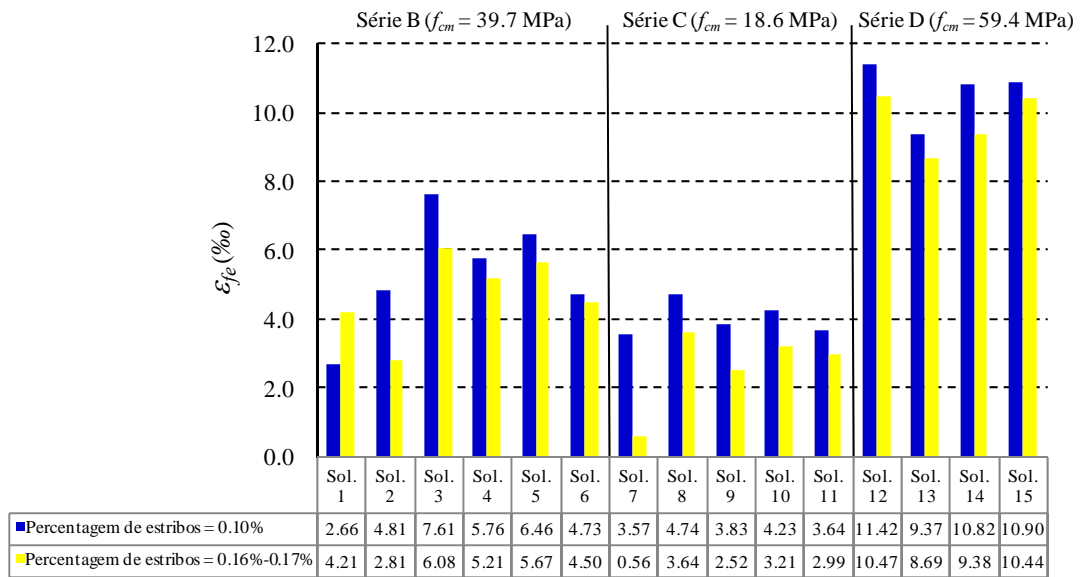


Figura 5.16 - Influência da percentagem de estribos de aço na efectividade do CFRP.

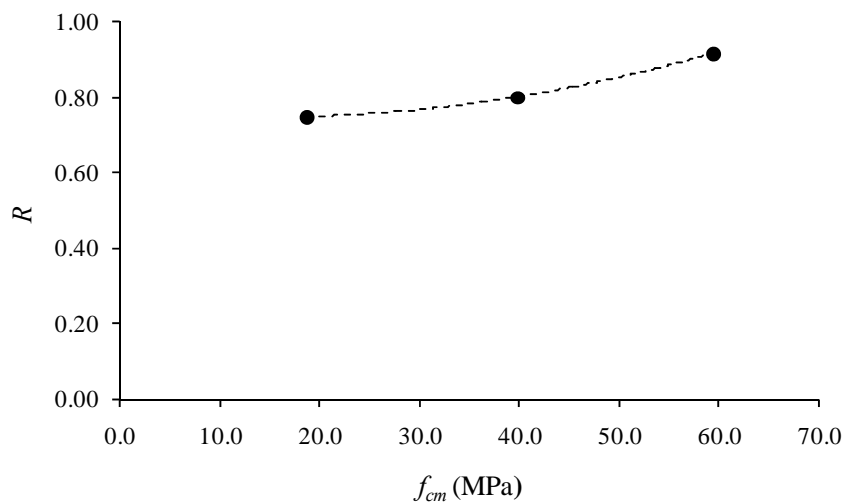


Figura 5.17 - Efeito da resistência do betão na eficácia de uma solução de reforço de CFRP.

5.4.4 - Efeito da percentagem de CFRP

A análise realizada aos modelos apresentados na Tabela 5.5, para estimar o efeito do tipo de betão no desempenho da técnica de reforço ao corte em estudo, pode ser expandida a todas as vigas ensaiadas no programa experimental do Capítulo 4. De forma a avaliar, também, o efeito da percentagem de CFRP (ρ_f) no referido desempenho, na Figura 5.18 apresenta-se a relação entre a percentagem ρ_f e a extensão efectiva no CFRP (ε_{fe} - determinada usando a equação (5.9)) para as vigas correspondentes às quatro séries ensaiadas (A, B, C e D) - ver Tabela 5.4.

A análise da Figura 5.18 permite verificar que a maior efectividade do reforço de CFRP foi alcançada nas vigas da série D. De um modo geral os reforços aplicados nas vigas da série C foram os que

tiveram menor desempenho. No entanto, importa referir que, tal como foi mencionado na descrição da série C (Capítulo 4), uma conclusão importante a retirar deste estudo é a viabilidade da técnica de reforço ao corte em análise para os casos de estruturas em que o betão apresente resistência baixa.

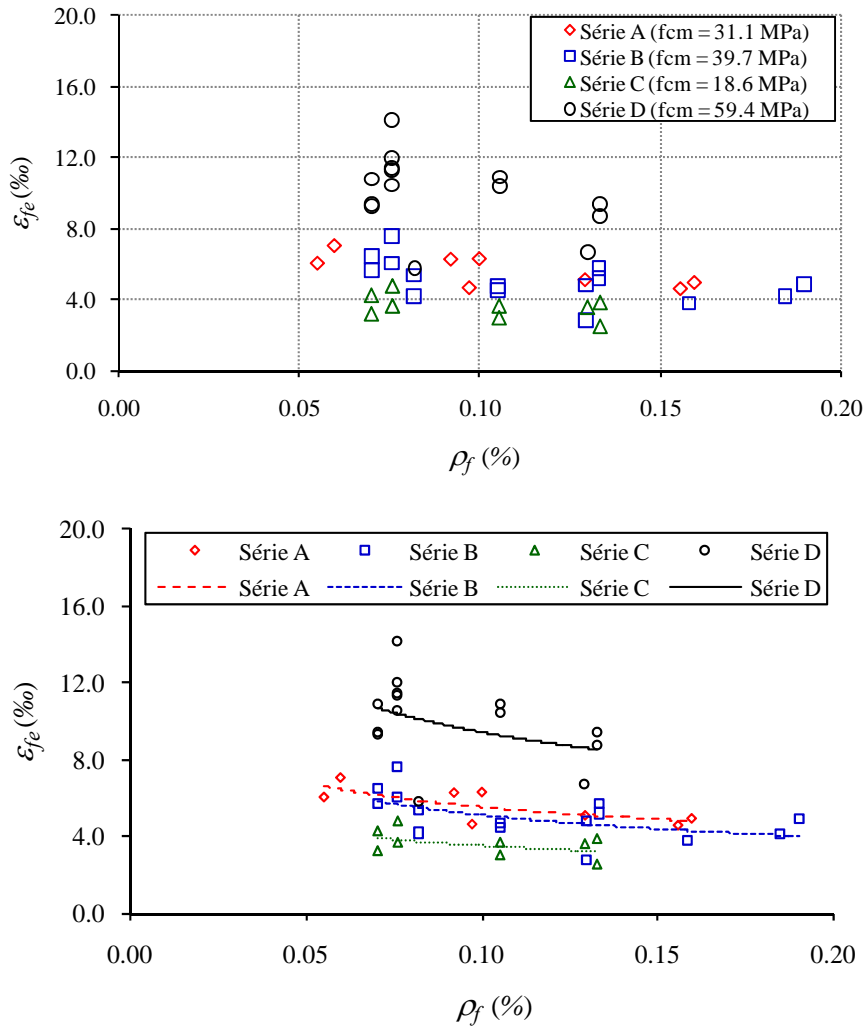


Figura 5.18 - Efectividade do reforço de CFRP (ε_{fe}) em função da percentagem ρ_f .

Uma outra constatação que se pode extrair da Figura 5.18 é que a efectividade do reforço, além de depender do tipo de betão, é sensível à percentagem de CFRP. Desta forma, justifica-se que se faça uma análise da variação da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) em função de um parâmetro que considere, simultaneamente, a percentagem de CFRP e o tipo de betão. Na Figura 5.19 é apresentada a variação de ε_{fe} em função do parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$, que engloba a percentagem do reforço de CFRP e o tipo de betão das vigas, por intermédio do valor médio da resistência à compressão à data do ensaio das mesmas (f_{cm}). A Figura 5.19 torna mais clara a interpretação feita anteriormente (Figura 5.14) em relação ao desempenho das soluções de reforço testadas em função da série de

vigas, ou seja, em função do tipo de betão. Além disso, é possível constatar que existe uma tendência para a diminuição da efectividade do CFRP (ε_{fe}) com o aumento do parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$.

Tendo em consideração os valores obtidos para a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f) das vigas testadas (Tabela 5.4), na Figura 5.20 ilustra-se a variação V_f com o parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$. A análise desta figura permite observar que de um modo geral existe um aumento do valor de V_f com o parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$.

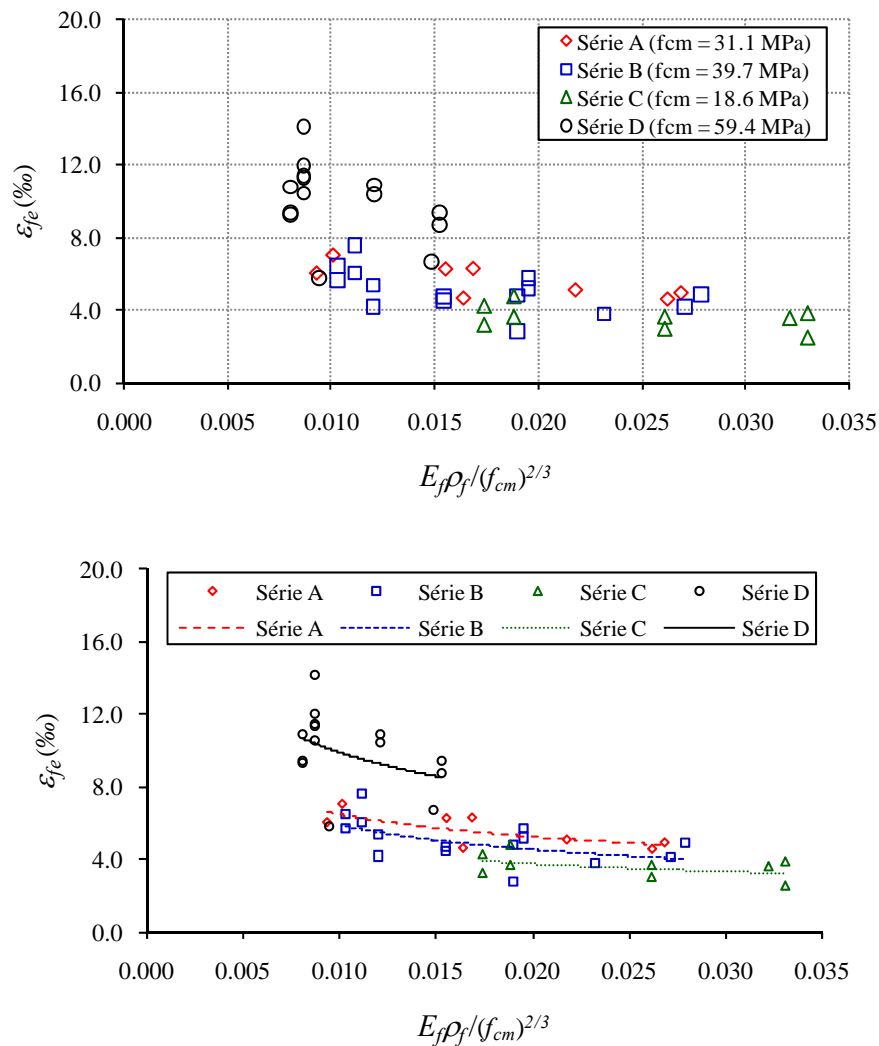


Figura 5.19 - Efectividade do reforço de CFRP (ε_{fe}) em função do parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$.

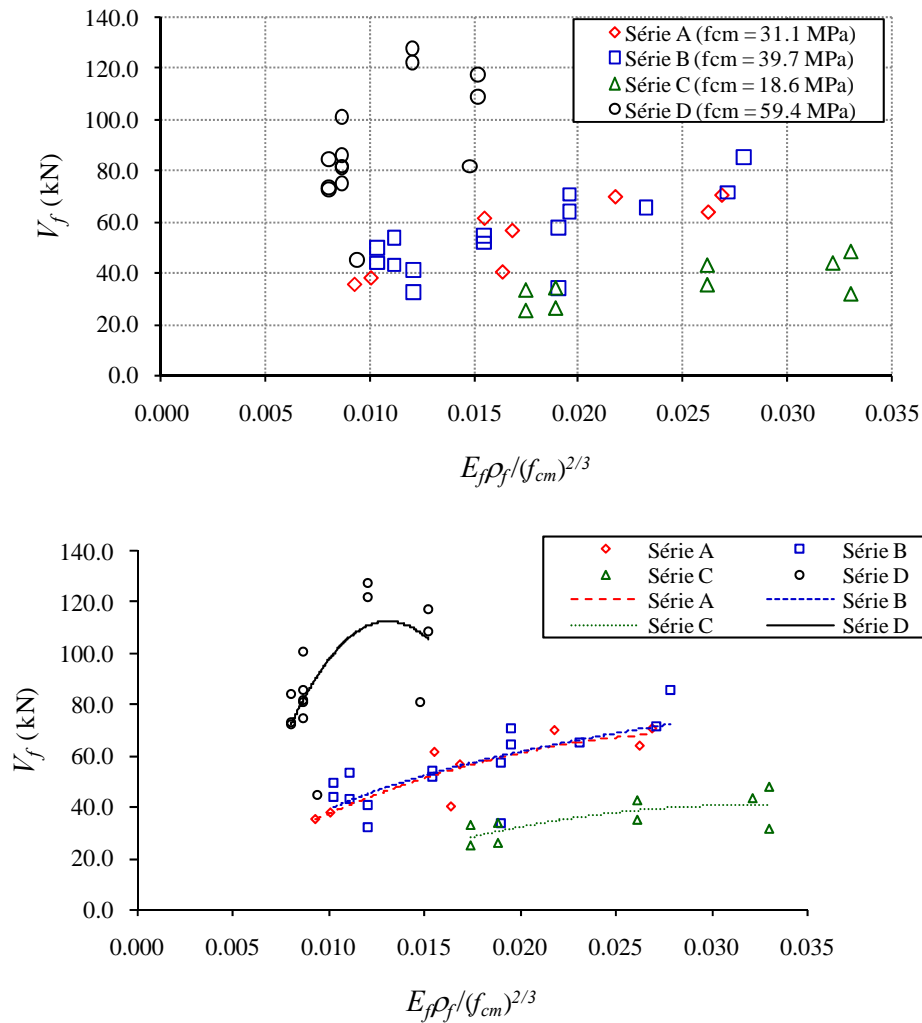


Figura 5.20 - Contribuição do reforço de CFRP (V_f) em função do parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$.

A análise do efeito da qualidade do betão e da percentagem de CFRP na eficácia da técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos permitiu concluir que na definição das expressões analíticas, que conduzam à quantificação do valor da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) para uma determinada solução de reforço, deve ser considerado um parâmetro que atenda, não só ao tipo de betão, como também à percentagem de CFRP. O parâmetro que foi utilizado na presente análise dos resultados experimentais foi $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$. Além disso, nas mencionadas expressões analíticas deve estar consagrado o facto da existência de uma interacção entre a armadura transversal (estribos de aço) que as vigas contêm e o reforço de CFRP.

5.4.5 - Efeito da orientação do reforço de CFRP

A orientação dos laminados em relação ao eixo longitudinal da viga foi um dos parâmetros associados ao CFRP que foi objecto de análise na investigação experimental efectuada. Em função

dos resultados experimentais obtidos é possível afirmar que as soluções com laminados inclinados a 45° e a 60° tiveram desempenhos claramente superiores às soluções de laminados verticais. Este melhor desempenho traduziu-se, conforme já foi referido ao longo do Capítulo 4, em maiores acréscimos de rigidez em serviço, de carga máxima, de deformação na rotura e de uma maior rentabilização das potencialidades do reforço de CFRP (valores mais elevadas da extensão registada no CFRP). Tal como se pode observar na Figura 5.21, a orientação das fendas de corte, bastante aquém da ortogonalidade em relação à das fibras do CFRP e os menores comprimentos de aderência dos laminados são características inerentes ao reforço com laminados verticais e que justificam o menor desempenho que estes obtiveram face ao verificado no caso dos laminados inclinados a 45° e a 60° .

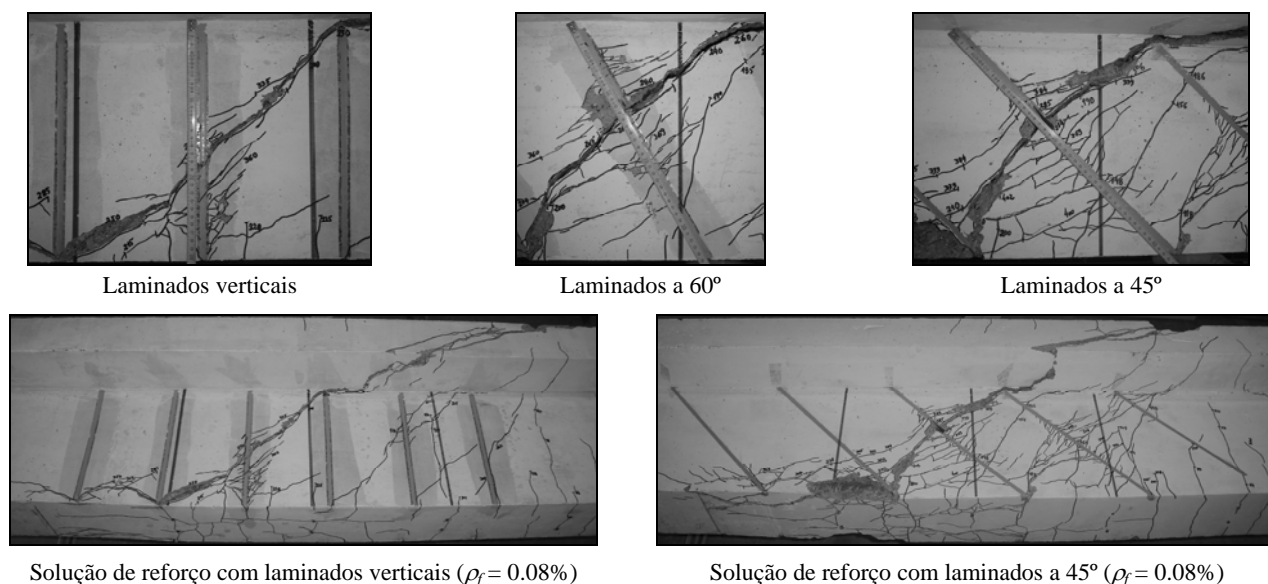


Figura 5.21 - Efeito da orientação do CFRP na eficácia da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados.

Na Tabela 5.7 é apresentada, de uma forma resumida, a efectividade do CFRP, em termos da extensão ε_{fe} obtida usando a equação (5.9) - ver Tabela 5.4, para cada uma das orientações dos laminados que foram testadas. Além do valor médio de ε_{fe} obtido em cada uma das quatro séries de vigas testadas (A, B, C e D), na Tabela 5.7 apresenta-se, para cada orientação do CFRP, o valor médio, máximo e mínimo de ε_{fe} resultante de uma análise global dos resultados (considerando simultaneamente os valores das quatro séries de vigas).

A análise dos valores apresentados na Tabela 5.7 permite comprovar que a maior efectividade do CFRP foi registada nas soluções de laminados inclinados. Relativamente ao verificado nestas soluções (laminados a 45° e 60°), o valor médio de ε_{fe} obtido no caso dos laminados verticais foi de 77%, 79% e 58%, respectivamente, nas séries A, B e D (na série C, onde apenas há um registo para a

solução de laminados verticais os valores médios de ε_{fe} para as três orientações foram semelhantes). O valor máximo de ε_{fe} alcançado nas quatro séries de vigas testadas foi de 6.7‰ (laminados verticais), 10.9‰ (laminados a 60°) e 14.1‰ (laminados a 45°). O valor mínimo de ε_{fe} alcançado nas quatro séries de vigas testadas foi de 2.8‰ (laminados verticais), 3.0‰ (laminados a 60°) e 2.5‰ (laminados a 45°). Independentemente da orientação do CFRP, o valor máximo de ε_{fe} foi atingido na série D e o valor mínimo de ε_{fe} foi atingido na série C (a exceção foi o CFRP a 90°). Em termos médios, considerando os valores das quatro séries de vigas ensaiadas, o valor de ε_{fe} da solução de laminados verticais foi cerca de 69% do verificado nas soluções de laminados inclinados.

Tabela 5.7 - Efectividade do reforço de CFRP em função da orientação dos laminados.

Efectividade do CFRP*	Laminados a 45°	Laminados a 60°	Laminados verticais
Valor médio de ε_{fe} na série A [‰]**	6.1 (3 vigas)	5.8 (3 vigas)	4.6 (2 vigas)***
Valor médio de ε_{fe} na série B [‰]**	5.9 (5 vigas)	5.0 (5 vigas)	4.3 (5 vigas)***
Valor médio de ε_{fe} na série C [‰]**	3.7 (4 vigas)	3.5 (4 vigas)	3.6 (1 viga)***
Valor médio de ε_{fe} na série D [‰]**	11.1 (7 vigas)	10.2 (6 vigas)	6.2 (2 vigas)
Valor médio de ε_{fe} das 4 séries [‰]	7.4 (19 vigas)	6.3 (18 vigas)	4.7 (10 vigas)
Valor máximo de ε_{fe} das 4 séries [‰]	14.1 (série D)	10.9 (série D)	6.7 (série D)
Valor mínimo de ε_{fe} das 4 séries [‰]	2.5 (série C)	3.0 (série C)	2.8 (série B)

* Valores obtidos a partir do valor de ε_e de cada viga calculado usando a equação (5.9) - ver Tabela 5.4. ** Valor entre parênteses refere-se ao número de vigas testadas com a solução de reforço em causa. *** Não foram consideradas na análise as vigas 2S-3LV-A, 2S-4LV-B e 4S-7LV-C.

Na Figura 5.22 apresenta-se a relação entre o parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$ e a efectividade do reforço de CFRP (ε_{fe} - determinada usando a equação (5.9); ver Tabela 5.4), onde é possível observar o melhor rendimento das soluções de laminados inclinados (45° e 60°) em relação às dos laminados verticais. Além disso, constata-se que a extensão efectiva para o caso dos reforços inclinados diminuiu com o aumento do parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$, sendo esta diminuição menos acentuada no caso das vigas com laminados verticais, isto é, a extensão efectiva no CFRP é menos sensível ao parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$ no caso de laminados verticais.

Tendo em consideração os valores obtidos para a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f) das vigas testadas (Tabela 5.4), na Figura 5.23 ilustra-se a variação V_f com o parâmetro $E_f \rho_f / (f_{cm})^{2/3}$. Nesta figura também é visível o melhor desempenho dos laminados inclinados em relação ao dos laminados verticais.

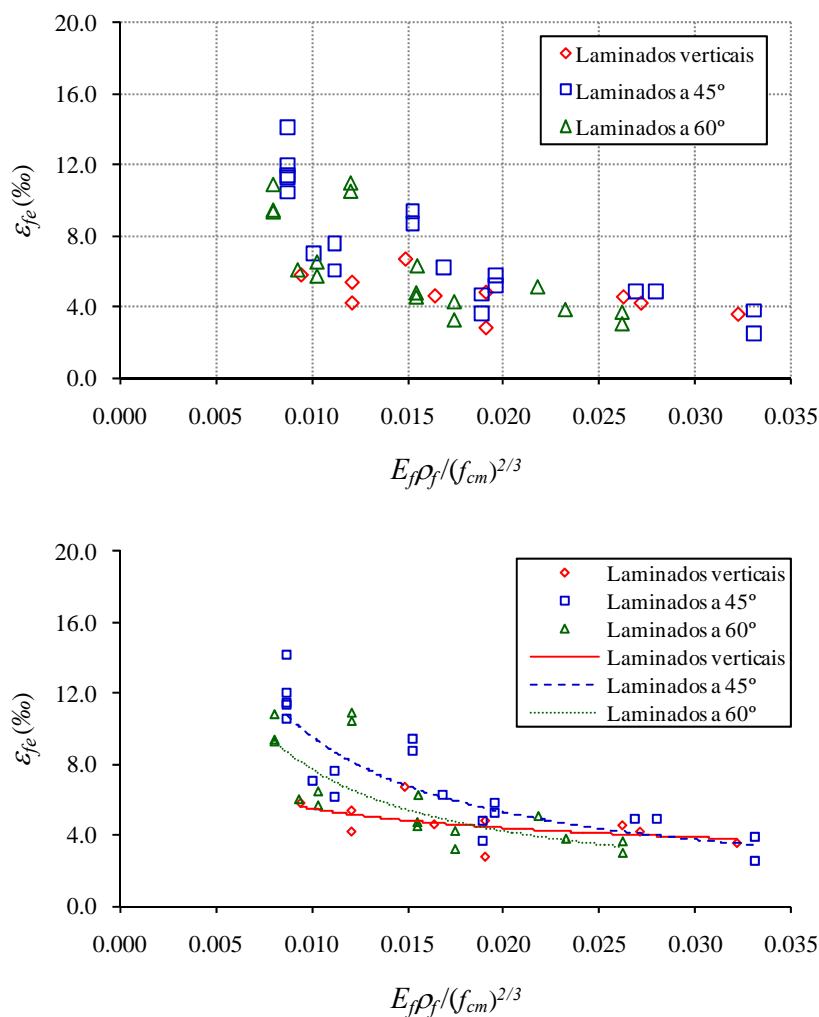


Figura 5.22 - Efectividade do reforço de CFRP (ε_{fe}) em função da orientação do CFRP.

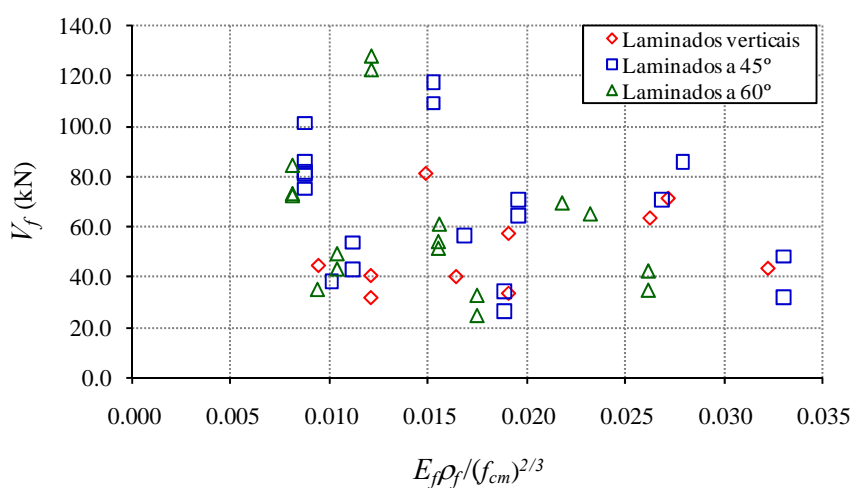


Figura 5.23 - Contribuição do reforço de CFRP (V_f) em função da orientação do CFRP.

5.4.6 - Efeito da relação a/d

Além da orientação e da percentagem do CFRP, da percentagem de armadura transversal e da classe de resistência do betão, outro parâmetro que influencia o desempenho estrutural do reforço de CFRP é a relação entre o vão de corte (a) e a altura útil da secção (d), a/d . As soluções de reforço aplicadas a vigas com a/d igual a 3.3 foram mais eficazes do que quando foram aplicadas a vigas com a/d igual a 2.5. No entanto, os resultados obtidos devem ser lidos tendo em consideração que as vigas com uma relação $a/d = 3.3$ continham um betão com $f_{cm} = 59.4$ MPa e as vigas com $a/d = 2.5$ continham um betão com $f_{cm} = 39.7$ MPa. Tendo em conta os modos de rotura observados, existe uma probabilidade muito grande do melhor rendimento das vigas com $a/d = 3.3$ estar mais associado à elevada resistência do betão do que ao valor da relação a/d .

5.5 - CONCLUSÕES

No presente capítulo foi feita uma análise geral aos resultados do programa experimental apresentado no Capítulo 4. Além de se pretender sistematizar os ensinamentos retirados da referida investigação experimental, a análise efectuada teve como objectivo servir de passagem da experimentação, da qual resultou uma robusta base de dados, ao estabelecimento de uma formulação analítica que permita quantificar o valor da extensão efectiva (ε_{fe}) expectável para uma determinada solução de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento das faces laterais da alma das vigas. Uma vez obtido o valor da extensão efectiva (ε_{fe}) será possível determinar o valor da contribuição do CFRP (V_f) na resistência ao esforço transversal por intermédio da equação (5.8).

Na definição da mencionada formulação analítica devem ser tidos em consideração todos os parâmetros que desempenham um papel crucial no comportamento estrutural de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos e que foram objecto de análise nesta dissertação: a percentagem e orientação dos laminados de CFRP, a classe de resistência do betão e a percentagem de armadura transversal.

Capítulo 6

Formulação analítica para definir a extensão efectiva no reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos

O presente capítulo tem como objectivo proceder ao estabelecimento de uma formulação analítica que, para uma determinada solução de reforço ao corte de uma viga de betão armado com laminados inseridos, permita avaliar a efectividade expectável do CFRP na altura da rotura da viga, ou seja, o valor da designada extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}). Para tal, serão usados os resultados obtidos na investigação experimental desenvolvida no âmbito desta dissertação (Capítulo 4) e que foram globalmente analisados no Capítulo 5.

6.1 - ESTRATÉGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DA FORMULAÇÃO ANALÍTICA

A quantificação da contribuição do reforço ao corte, por intermédio da inserção de laminados de CFRP, na resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado (V_f) pode ser efectuada por intermédio da equação (5.8). Para que esta equação seja aplicável torna-se necessário, previamente, definir qual o valor da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) associada à solução de reforço em estudo. Tendo por base as considerações efectuadas na secção 5.4 do Capítulo 5 foi possível delinear uma estratégia para o desenvolvimento da formulação analítica que permita obter a efectividade do reforço (ε_{fe}) e que se baseia nos seguintes procedimentos:

- i) Definição, para cada tipo de orientação do CFRP testada (laminados a 45°, a 60° e a 90°), de uma equação que relacione a extensão efectiva do reforço (ε_{fe}) com o parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$. Desta forma, serão considerados quatro factores que, em função da experimentação realizada nesta dissertação, são fundamentais no comportamento de uma viga reforçada ao corte com a técnica de reforço em análise: a percentagem e orientação dos laminados de CFRP, a classe de resistência do betão e a percentagem de armadura transversal existente.
- ii) A partir do resultado da tarefa descrita em i), será definida uma única equação que relacione ε_{fe} , simultaneamente, com o parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ e com a orientação dos laminados de CFRP (θ_f).
- iii) Utilizando a equação (5.8), será calculado o valor da contribuição para a resistência ao esforço transversal (V_f) de cada solução de reforço de CFRP testada no âmbito do programa experimental

apresentado no Capítulo 4. Para a quantificação do valor da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) deve ser tida em consideração a equação obtida em ii). Posteriormente, será feita uma análise comparativa entre os valores analíticos e experimentais de V_f de forma a validar a equação proposta para a obtenção da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}).

Em face do exposto, dos parâmetros que foram analisados no programa experimental do Capítulo 4 não será tido em conta o relativo à relação a/d . Com efeito, tal como já foi mencionado anteriormente, as vigas com as mesmas soluções de CFRP, diferenciadas pelo valor da relação a/d , tinham betões de classe de resistência bastante diferente. O betão das vigas com $a/d = 2.5$ tinha um valor de $f_{cm} = 39.7$ MPa, enquanto o das vigas com $a/d = 3.3$ tinha um valor de $f_{cm} = 59.4$ MPa. Atendendo aos modos de ruína observados, conclui-se que o melhor desempenho registado nas vigas com $a/d = 3.3$ esteve mais associado à resistência elevada do betão do que a qualquer influência que se possa atribuir à relação a/d . Assim sendo, torna-se recomendável a realização de investigação experimental concebida para avaliar o efeito do parâmetro a/d na eficácia da técnica de reforço em estudo, de forma a ser possível integrar, sustentadamente, a influência deste parâmetro na formulação analítica que será desenvolvida neste capítulo.

6.2 - DESENVOLVIMENTO DA FORMULAÇÃO ANALÍTICA

Nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam-se, respectivamente, para as soluções de laminados a 45°, a 60° e a 90°, e em função do parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ considerando 200 GPa para o módulo de elasticidade da armadura transversal (E_s), os valores da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) referentes a 90% das vigas ensaiadas no programa experimental do Capítulo 4 (Tabela 5.4). As vigas não consideradas nesta análise foram: viga 5S-5LI45F-D para o caso do reforço a 45°, viga 5S-8LI60-D para o caso do reforço a 60° e vigas 2S-3LV-A, 2S-4LV-B e 4S-7LV-C para o caso do reforço a 90°. O motivo pelo qual as mencionadas vigas não foram incluídas relaciona-se com o facto de lhe estarem associados, por excesso (os dois primeiros casos) ou por defeito (os três últimos casos), valores da extensão efectiva no CFRP que se distanciam claramente dos que foram obtidos nas restantes vigas ensaiadas.

Nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam-se, respectivamente, para as soluções de laminados a 45°, a 60° e a 90°, as curvas de tendência da variação da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) com o parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$. Em face do apresentado nestas figuras, é possível afirmar que as curvas que melhor se aproximam (maior valor de R^2) dos resultados experimentalmente obtidos, em termos da variação anteriormente referida são:

para o caso de laminados inclinados a 45°

$$\varepsilon_{fe} = 0.1685 \times \left[(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3}) \right]^{-1.117} \quad (6.1)$$

para o caso de laminados inclinados a 60°

$$\varepsilon_{fe} = 0.153 \times \left[(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3}) \right]^{-1.102} \quad (6.2)$$

para o caso de laminados verticais

$$\varepsilon_{fe} = 0.5162 \times \left[(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3}) \right]^{-0.675} \quad (6.3)$$

Nas equações (6.1), (6.2) e (6.3) os valores de E_f e de E_s devem ser introduzidos em GPa e o valor de f_{cm} em MPa. Os valores de ρ_f e de ρ_{sw} devem ser introduzidos em termos de taxa e não em percentagem.

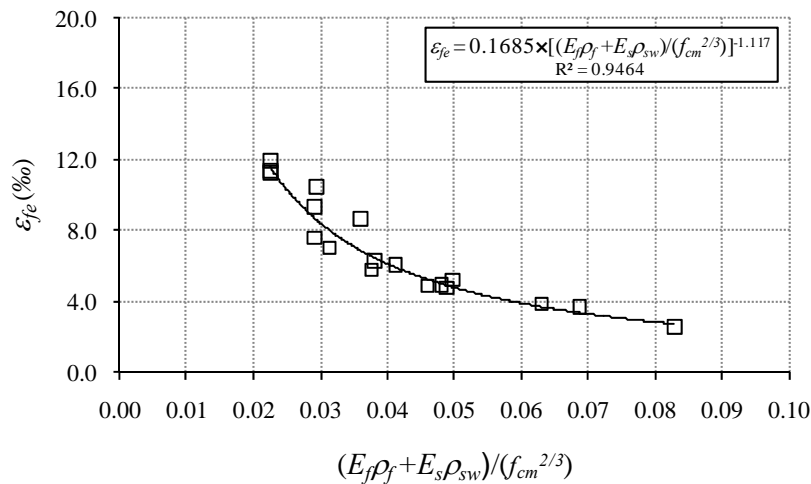


Figura 6.1 - Definição da curva de tendência da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) com o parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ para as soluções de laminados a 45° .

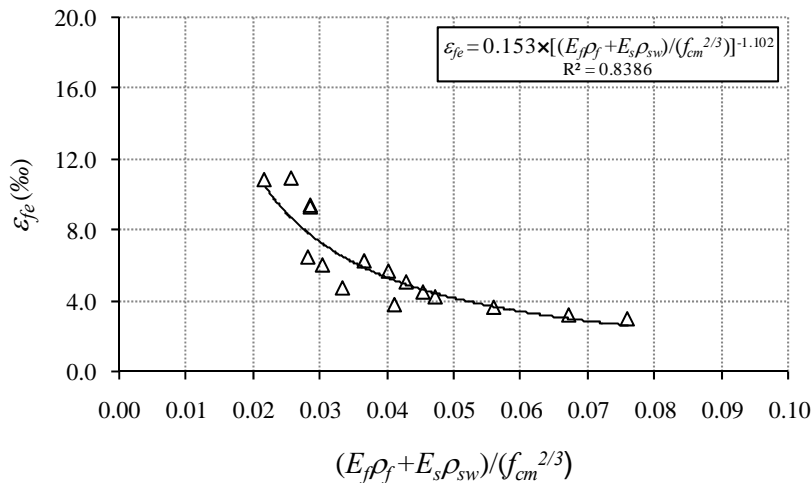


Figura 6.2 - Definição da curva de tendência da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) com o parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ para as soluções de laminados a 60° .

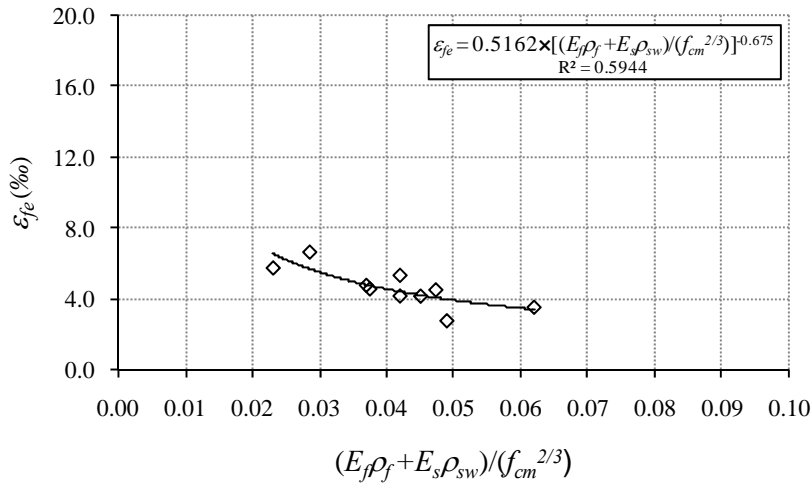


Figura 6.3 - Definição da curva de tendência da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) com o parâmetro $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ para as soluções de laminados verticais.

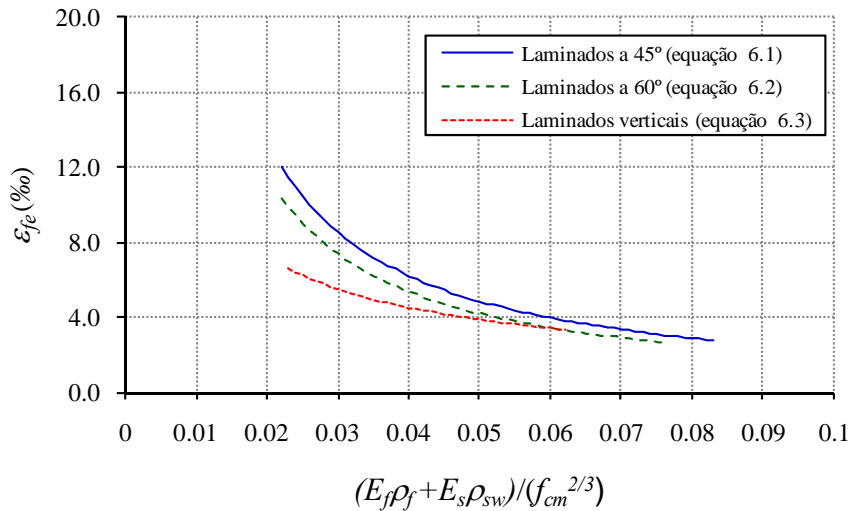


Figura 6.4 - Variação da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) vs $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ em função da orientação do CFRP atendendo às equações (6.1) a (6.3).

Na Figura 6.4 apresentam-se, em função da orientação dos laminados, as leis de variação da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) vs $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ definidas pelas equações (6.1) a (6.3). Para cada curva apresentada, o limite inferior e superior do parâmetro $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ corresponde, respectivamente, ao valor mínimo e máximo de $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ referente às vigas ensaiadas com CFRP. O valor mínimo de $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ para os laminados inclinados a 45°, a 60° e verticais foi, respectivamente, 0.022, 0.022 e 0.023, enquanto o valor máximo de $\left(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}\right) / \left(f_{cm}^{2/3}\right)$ para os laminados inclinados a 45°, a 60° e verticais foi, respectivamente, 0.083, 0.076 e 0.062.

Na Figura 6.5 apresentam-se as leis de variação (6.1) a (6.3) estendidas ao intervalo de valores de $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ compreendidos entre 0.01 e 0.1. Em cada uma destas leis estão assinalados os pontos correspondentes aos extremos do intervalo de valores de $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ das vigas ensaiadas e que anteriormente foram referidos (ver também Figura 6.4). O limite superior admissível para a extensão efectiva no CFRP deve ser igual ao valor da máxima extensão alcançada pelos laminados em ensaios de tracção uniaxial, estando este, na Figura 6.5, assinalado por intermédio de uma linha horizontal que corresponde ao valor médio da extensão de rotura dos laminados utilizados na presente dissertação.

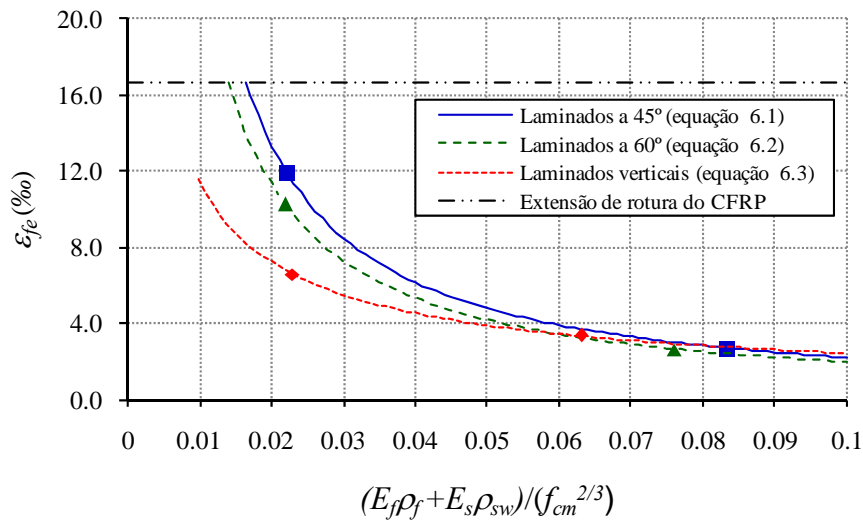


Figura 6.5 - Variação da extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}) vs $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ em função da orientação do CFRP atendendo às equações (6.1) a (6.3) (generalização).

Tal como se pode observar nas Figura 6.4 e 6.5, as leis de variação obtidas evidenciam uma diminuição da efectividade do CFRP com o aumento do parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$, com particular destaque para as soluções de laminados inclinados até $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ igual a 0.05. Além disso, constata-se que os valores de ε_{fe} para o caso de laminados a 45° e a 60° são superiores aos da solução de laminados na vertical, nomeadamente, para valores de $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ inferiores a 0.05. Um outro aspecto que se destaca da análise das Figuras 6.4 e 6.5 é a tendência de uma efectividade ligeiramente superior para o caso dos laminados a 45° em relação à orientação de 60°.

De acordo com o que foi referido na secção 6.1 deste capítulo, posteriormente ao estabelecimento das equações (6.1), (6.2) e (6.3), pretende-se definir uma única expressão analítica que relacione a

extensão efectiva no CFRP (ε_{fe}), quer com o parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ como com a orientação do CFRP (θ_f).

De uma forma genérica, as equações (6.1), (6.2) e (6.3) apresentam o seguinte formato:

$$\varepsilon_{fe} = C_1 \times \left[(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3}) \right]^{-C_2} \quad (6.4)$$

em que os factores C_1 e C_2 podem ser determinados em função da orientação do CFRP (θ_f). Considerando os valores de C_1 e C_2 das equações (6.1), (6.2) e (6.3), respectivamente, para θ_f igual a 45°, 60° e 90° é possível definir a lei de variação (6.5) para o factor C_1 e a lei de variação (6.6) para o factor C_2 , ambas em função de θ_f e com um valor de R^2 igual à unidade:

$$C_1 = 3.76888 \times e^{(-0.1160261\theta_f + 0.0010437\theta_f^2)} \quad (6.5)$$

$$C_2 = 0.460679 \times e^{(0.0351199\theta_f - 0.0003431\theta_f^2)} \quad (6.6)$$

Tendo em consideração as equações (6.4) a (6.6), a expressão analítica que conduzirá a determinação da extensão efectiva do CFRP, em função do parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$ e da orientação do CFRP (θ_f) é a seguinte:

$$\varepsilon_{fe} = 3.76888 \times e^{(-0.1160261\theta_f + 0.0010437\theta_f^2)} \times \left[(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3}) \right]^{-0.460679 \times e^{(0.0351199\theta_f - 0.0003431\theta_f^2)}} \quad (6.7)$$

Atendendo ao facto do coeficiente R^2 associado às equações que definem os factores C_1 e C_2 , em função da orientação do CFRP (equações (6.5) e (6.6)), ter um valor de 1.0, a equação (6.7) para o caso do reforço com laminados a 45°, 60° e 90° toma a forma das equações (6.1), (6.2) e (6.3), respectivamente. Assim, nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 é possível observar o nível de aproximação que a equação (6.7) toma para o caso das vigas que foram ensaiadas com a inserção de laminados a 45°, 60° e 90°, respectivamente.

6.3 - VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO ANALÍTICA DESENVOLVIDA

Tendo em consideração a equação (6.7), foram determinados os valores da extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) para cada uma das vigas consideradas na definição da formulação analítica desenvolvida.

No âmbito da análise que se fará ao longo deste capítulo, os valores de ε_{fe} referidos anteriormente, por terem sido obtidos analiticamente, serão designados a partir deste momento por ε_{fe}^{ana} . Uma vez conhecidas as extensões ε_{fe}^{ana} , e utilizando a equação (5.8), foram calculados os valores analíticos da contribuição do CFRP para a resistência ao esforço transversal (V_f^{ana}). Estes valores (V_f^{ana}) foram, posteriormente, comparados com os obtidos experimentalmente (V_f^{exp}) por intermédio da análise do factor k ($k = V_f^{exp} / V_f^{ana}$). Os valores de V_f^{exp} adoptados foram os obtidos utilizando o cenário B definido na secção 5.4.1 do Capítulo 5 (penúltima coluna da Tabela 5.4).

Nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam-se os resultados do estudo que se acaba de descrever para as soluções testadas com laminados a 45°, 60° e 90°, respectivamente. Além disso, para cada orientação do CFRP, apresentam-se os valores médios de k , e respectivos desvios padrão, considerando: a totalidade das vigas analisadas (k_{med}); as vigas agrupadas por série de ensaios ($k_{med, Série}$).

Devido ao facto de toda a formulação analítica estar a ser definida com base em resultados experimentais considerando as propriedades médias dos materiais, na análise da relação entre valores experimentais e valores analíticos (V_f^{exp} / V_f^{ana}) será tomado como princípio que a simulação do comportamento experimental, por intermédio da formulação analítica, é adequada se a referida relação tiver valores próximos da unidade do lado da segurança. Se o valor da relação V_f^{exp} / V_f^{ana} for inferior à unidade, ou seja, se o valor expectável for superior ao que efectivamente foi atingido experimentalmente, indicia uma situação de insegurança. Se o valor da relação V_f^{exp} / V_f^{ana} for superior à unidade, ou seja, se o valor expectável for inferior ao que efectivamente foi atingido experimentalmente, indicia uma situação de segurança.

Considerando, para cada uma das orientações testadas, os valores do parâmetro k obtidos em todas as vigas apresentadas nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 é possível verificar que o valor médio de k (k_{med}), para as soluções de laminados a 45°, 60° e 90° é, respectivamente, 1.00, 1.01 e 1.01. Em termos de desvio padrão verifica-se que o seu valor é de 0.11, 0.16 e 0.15 para as soluções de laminados a 45°, 60° e 90°, respectivamente.

Tabela 6.1 - Análise das soluções testadas com laminados a 45°.

Vigas [*]	V_f^{exp} [kN]	ε_{fe}^{**} [‰]	ε_{fe}^{ana} [‰]	V_f^{ana} [kN]	k	$k_{med,Série}^{***}$	k_{med}^{****}
2S-3LI45-A	37.9	7.04	8.08	43.6	0.87	0.94 (0.06)	1.00 (0.11)
2S-5LI45-A	56.5	6.28	6.50	58.4	0.97		
2S-8LI45-A	70.3	4.90	5.00	71.8	0.98		
2S-4LI45-B	53.4	7.61	8.74	61.3	0.87	0.95 (0.09)	
2S-7LI45-B	70.7	5.76	6.59	80.9	0.87		
2S-10LI45-B	85.6	4.88	5.26	92.3	0.93		
4S-4LI45-B	42.7	6.08	5.95	41.7	1.02		
4S-7LI45-B	64.0	5.21	4.83	59.4	1.08	1.00 (0.07)	
2S-4LI45-C	33.9	4.74	4.93	35.2	0.96		
2S-7LI45-C	48.0	3.83	3.70	46.4	1.03		
4S-4LI45-C	26.0	3.64	3.36	24.0	1.08		
4S-7LI45-C	31.6	2.52	2.72	34.1	0.92	1.08 (0.12)	
3S-5LI45-D	81.7	11.42	11.70	83.7	0.98		
3S-9LI45-D	117.4	9.37	8.79	110.2	1.07		
3S-5LI45F1-D	85.8	11.99	11.70	83.7	1.02		
3S-5LI45F2-D	80.9	11.31	11.70	83.7	0.97		
5S-5LI45-D	74.9	10.47	8.68	62.1	1.21		
5S-9LI45-D	108.9	8.69	6.93	86.9	1.25		

* A viga 5S-5LI45F-D não foi considerada na definição da equação (6.1) e na presente análise. ** Valores obtidos usando a equação (5.9) a partir do valor V_f^{exp} : ver última coluna da Tabela 5.4 (laminados a 45°). *** Valor médio de k por série de ensaios (os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão). **** Valor médio de k de todas as vigas (os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão).

Tabela 6.2 - Análise das soluções testadas com laminados a 60°.

Vigas [*]	V_f^{exp} [kN]	ε_{fe}^{**} [‰]	ε_{fe}^{ana} [‰]	V_f^{ana} [kN]	k	$k_{med,Série}^{***}$	k_{med}^{****}
2S-3LI60-A	35.4	6.02	7.16	42.1	0.84	0.98 (0.12)	1.01 (0.16)
2S-5LI60-A	61.3	6.25	5.84	57.3	1.07		
2S-7LI60-A	69.7	5.07	4.91	67.5	1.03		
2S-4LI60-B	49.7	6.46	7.77	59.6	0.83	0.87 (0.15)	
2S-6LI60-B	54.4	4.73	6.47	74.3	0.73		
2S-9LI60-B	65.3	3.79	5.14	88.7	0.74		
4S-4LI60-B	43.5	5.67	5.27	40.4	1.08		
4S-6LI60-B	51.7	4.50	4.61	53.0	0.98		
2S-4LI60-C	33.1	4.23	4.42	34.6	0.96	1.04 (0.08)	
2S-6LI60-C	42.7	3.64	3.67	43.0	0.99		
4S-4LI60-C	25.1	3.21	3.00	23.5	1.07		
4S-6LI60-C	35.1	2.99	2.62	30.8	1.14		
3S-5LI60-D	84.6	10.82	10.37	81.1	1.04	1.19 (0.10)	
3S-8LI60-D	127.9	10.90	8.61	100.9	1.27		
5S-5LI60-D	73.4	9.38	7.66	59.9	1.22		
5S-5LI60F-D	72.6	9.28	7.66	59.9	1.21		

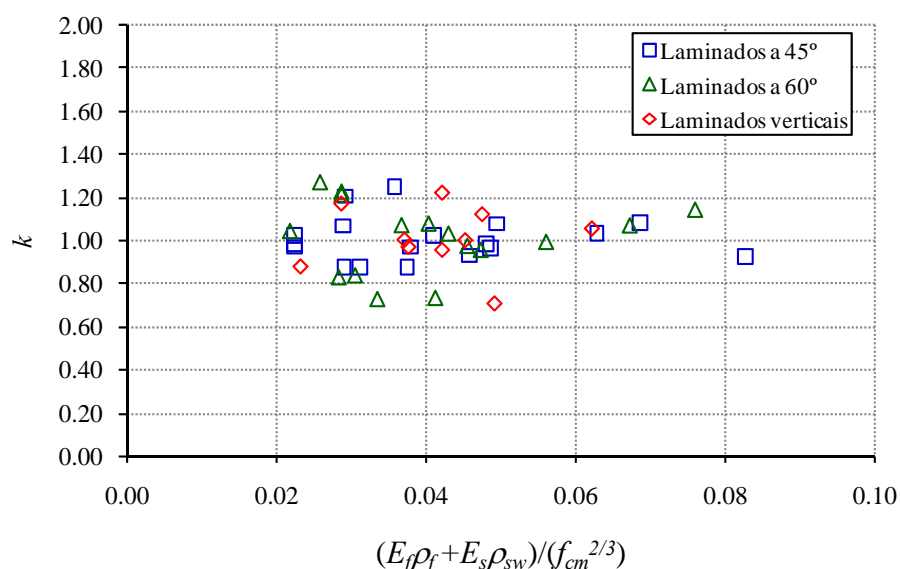
* A viga 5S-8LI60-D não foi considerada na definição da equação (6.2) e na presente análise. ** Valores obtidos usando a equação (5.9) a partir do valor V_f^{exp} : ver última coluna da Tabela 5.4 (laminados a 60°). *** Valor médio de k por série de ensaios (os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão). **** Valor médio de k de todas as vigas (os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão).

Tabela 6.3 - Análise das soluções testadas com laminados verticais.

Vigas *	V_f^{exp} [kN]	ε_{fe}^{**} [‰]	ε_{fe}^{ana} [‰]	V_f^{ana} [kN]	k	$k_{med,Série}^{***}$	k_{med}^{****}
2S-5LV-A	40.3	4.60	4.73	41.4	0.97	1.05	1.01 (0.15)
2S-8LV-A	63.7	4.55	4.04	56.6	1.13	(0.11)	
2S-7LV-B	57.5	4.81	4.78	57.1	1.01	0.98 (0.18)	
2S-10LV-B	71.5	4.20	4.18	71.2	1.00		
4S-4LV-B	31.9	4.21	4.38	33.2	0.96		
4S-4LVa-B	40.7	5.37	4.38	33.2	1.23		
4S-7LV-B	33.6	2.81	3.95	47.3	0.71		
2S-7LV-C	43.6	3.57	3.37	41.1	1.06	1.06	
3S-6LV-D	44.7	5.79	6.56	50.7	0.88	1.03	
3S-10LV-D	81.5	6.68	5.69	69.4	1.17	(0.21)	

* As vigas 2S-3LV-A, 2S-4LV-B e 4S-7LV-C não foram consideradas na definição da equação (6.3) e na presente análise. ** Valores obtidos usando a equação (5.9) a partir do valor V_f^{exp} : ver última coluna da Tabela 5.4 (laminados verticais). *** Valor médio de k por série de ensaios (os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão).

**** Valor médio de k de todas as vigas (os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão).

Figura 6.6 - Valores de k para a totalidade das vigas analisadas.

Numa primeira análise, os valores para o parâmetro k_{med} obtidos são muito satisfatórios. No entanto, apesar de um número bastante significativo de vigas terem apresentado valores de k próximo da unidade, ou superior, existem algumas situações em que o referido valor de k fica bastante aquém da unidade (valores de k inferiores à unidade - ver Figura 6.6). Do conjunto de vigas que se encontram nestas circunstâncias destacam-se as vigas 2S-6LI60-B ($k = 0.73$), 2S-9LI60-B ($k = 0.74$) e 4S-7LV-B ($k = 0.71$). Os modos de rotura verificados nestas três vigas podem justificar o baixo valor de V_f experimentalmente obtido. Com efeito, quando a carga máxima das vigas 2S-6LI60-B e 4S-7LV-B foi obtida existiam laminados que já se encontravam desactivados e, assim sendo, não faziam parte do mecanismo resistente à fenda de rotura de corte. Para as mencionadas vigas a desactivação dos referidos laminados condicionou de forma significativa o desempenho das soluções de reforço. No

caso da viga 2S-9LI60-B a carga máxima foi atingida imediatamente antes de ocorrer a cedência de um laminado com um reduzido comprimento de aderência. Apesar da viga ter apresentado uma certa ductilidade, a sua capacidade de carga não viria a aumentar após a cedência do referido laminado.

Para colmatar todo o tipo de interferência que possa ter induzido a valores de k inferiores à unidade, na expressão (6.7) vai ser introduzido um factor de incerteza relativo ao desempenho do CFRP, designado por γ_f . Como critério para a definição deste factor foi estabelecido que em cerca de 95% das vigas analisadas o valor de k teria que ser igual ou superior à unidade. Para este propósito, conclui-se que o valor de γ_f deve ser igual a 1.3.

Na Figura 6.7 apresentam-se os valores de k para a situação em que os valores analíticos da contribuição do CFRP para a resistência ao esforço transversal (V_f^{ana}) foram obtidos considerando o resultado da expressão (6.7) dividido pelo factor γ_f de valor igual a 1.3. Trata-se assim de uma translação da nuvem de pontos da Figura 6.6 para o lado da segurança ($k \geq 1.0$).

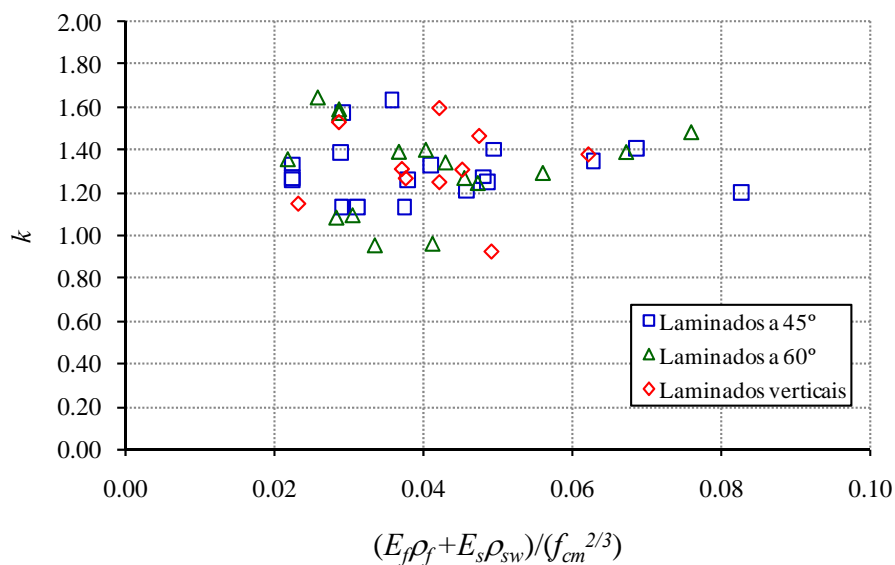


Figura 6.7 - Valores de k para a totalidade das vigas analisadas considerando o factor γ_f .

Na Figura 6.8 apresenta-se a relação entre o valor experimental (V_f^{exp}) e o valor analítico (V_f^{ana}) da contribuição do CFRP para a resistência ao esforço transversal das vigas consideradas no desenvolvimento da formulação analítica do presente capítulo. A análise desta figura permite verificar que a nuvem de pontos correspondente a cerca de 95% das mencionadas vigas está do lado da segurança (parte superior da diagonal representada na Figura 6.8).

Como nota final deste capítulo reafirma-se que a definição da equação (6.7) teve como base os valores experimentais de V_f obtidos utilizando o cenário B definido na secção 5.4.1. do Capítulo 5.

Tal como se referiu anteriormente foi também com estes valores experimentais que foi feita a análise comparativa V_f^{exp} versus V_f^{ana} (Tabelas 6.1 a 6.3 e Figuras 6.6 a 6.8). No referido cenário de quantificação de V_f^{exp} considerou-se o facto de em algumas vigas com CFRP a contribuição da armadura transversal na resistência ao corte ter sido menor do que a verificada nas vigas sem CFRP.

Se na Figura 6.8 os valores experimentais forem substituídos pelos que foram obtidos utilizando o cenário A definido na secção 5.4.2. do Capítulo 5 (neste cenário a contribuição da armadura transversal na resistência ao esforço transversal no caso das vigas reforçadas é a mesma da viga sem CFRP) o posicionamento da nuvem de pontos passa a ser o representado na Figura 6.9. Os pontos que estão mais distantes da diagonal do lado da insegurança referem-se às vigas 2S-3LI45-A, 2S-8LI45-A e 3S-6LV-D. Estas vigas foram aquelas em que se verificou uma diminuição mais significativa da contribuição da armadura transversal na resistência ao corte tendo como base a referida contribuição na viga não reforçada. Apesar destes casos é possível verificar a existência de uma boa aproximação entre valores experimentais e analíticos.

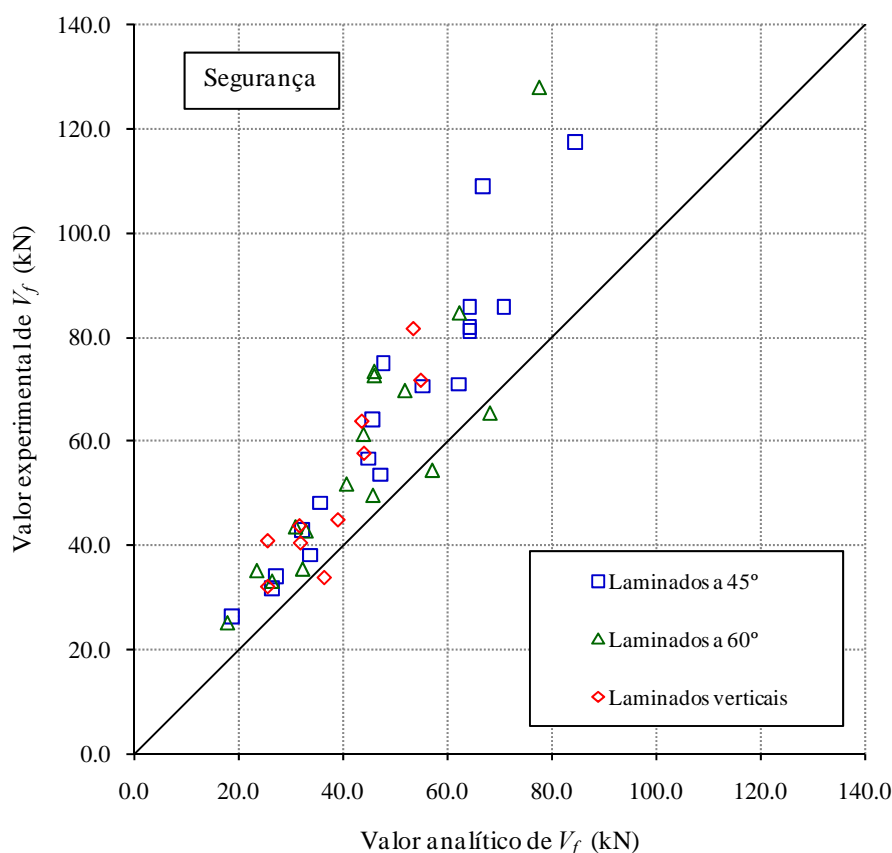


Figura 6.8 - Comparação entre os valores experimentais e analíticos da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f).

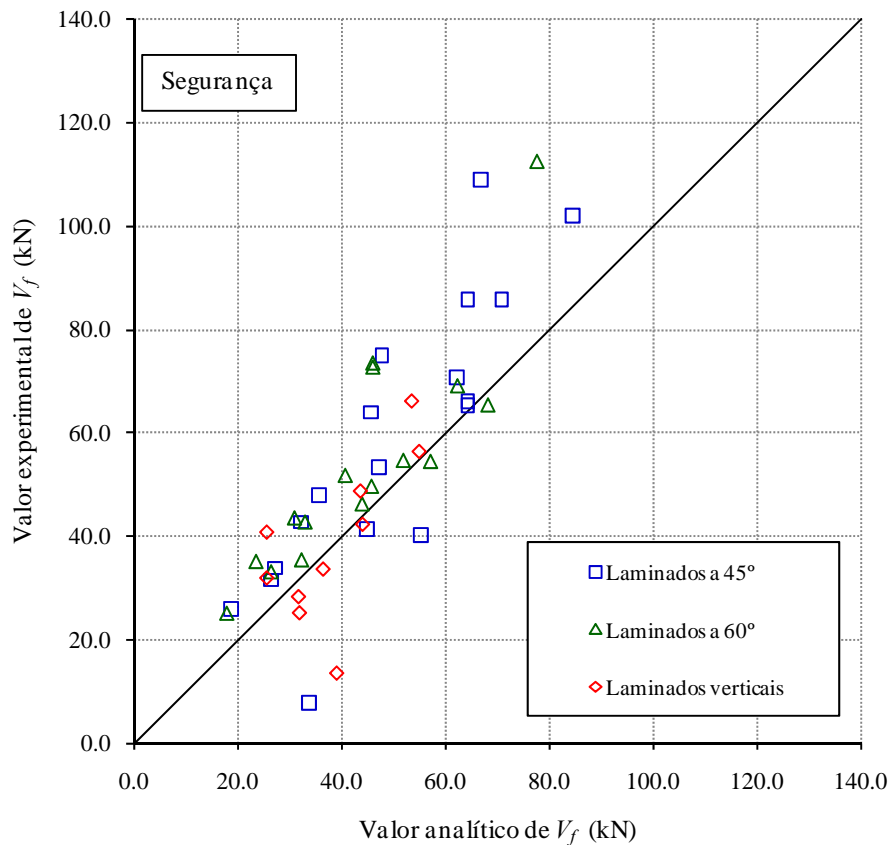


Figura 6.9 - Comparação entre os valores experimentais (Cenário A) e analíticos da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f).

6.4 - CONCLUSÕES

Neste capítulo procedeu-se ao estabelecimento da formulação analítica que permite obter o valor da extensão efectiva do CFRP para uma determinada solução de reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP. A referida formulação foi desenvolvida tendo em conta os resultados experimentais obtidos no Capítulo 4. A expressão analítica resultante depende de parâmetros como a percentagem e a orientação do CFRP, a percentagem de armadura transversal e a classe de resistência do betão.

De forma a ter em conta um conjunto de factores associados ao CFRP, na formulação analítica foi introduzido um factor de incerteza da eficiência do reforço, γ_f . Este factor ($\gamma_f = 1.3$) foi obtido por forma a que, em 95% das vigas consideradas no estabelecimento da formulação analítica, o valor da relação entre a contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal, obtida experimentalmente (V_f^{exp}) e a determinada analiticamente (V_f^{ana}) fosse igual ou superior à unidade ($V_f^{exp} / V_f^{ana} \geq 1.0$).

Capítulo 7

Considerações finais

A realização do trabalho de investigação desenvolvido no âmbito da presente dissertação pretendeu dar um passo em frente no estado de conhecimento na área do reforço de estruturas de betão, nomeadamente, no que diz respeito às técnicas de reforço que recorrem à utilização de materiais de elevado desempenho, como é o caso dos polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP).

O reforço ao corte de vigas de betão armado com materiais compósitos de CFRP foi o tema central desta dissertação. Da análise da investigação realizada até à data do início do presente trabalho, foi possível concluir que as elevadas potencialidades dos CFRP, quando aplicados recorrendo à técnica da colagem externa, não eram, em geral, mobilizadas de uma forma satisfatória, principalmente quando o CFRP é colado nas faces laterais da viga, ou em forma de U. Com o objectivo de otimizar o nível de desempenho do CFRP, quando este é aplicado de forma a ser incrementada a capacidade resistente ao esforço transversal de vigas de betão armado, foi definida uma linha de investigação no âmbito desta dissertação, na qual foi proposta e estudada uma nova técnica de reforço ao corte com CFRP, alternativa à da colagem externa, que se baseia na inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da viga.

Os aspectos essenciais associados à execução da técnica de reforço proposta, a verificação experimental da sua eficácia e a proposta de uma formulação analítica que proporcione a quantificação da contribuição do CFRP inserido na resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado, foram objecto de desenvolvimento nesta dissertação. As diversas conclusões a extrair do trabalho de investigação efectuado foram devidamente assinaladas nos capítulos precedentes, pelo que apenas as mais relevantes serão enumeradas na secção seguinte.

7.1 - CONCLUSÕES GERAIS

A realização dos trabalhos associados a esta dissertação permitem avançar, de uma forma genérica, com as seguintes conclusões:

i) Aplicação do reforço com laminados de CFRP inseridos

A experiência adquirida no reforço das vigas de betão armado ensaiadas no programa experimental desta investigação permite afirmar que a técnica de reforço ao corte por inserção de laminados de

CFRP é de fácil e rápida execução. No entanto, é fundamental que o aplicador tenha conhecimento das boas práticas da execução desta técnica de reforço, que se baseiam num conjunto de procedimentos nos quais estão consagrados aspectos que garantam um rigoroso controlo de qualidade da execução do reforço.

Os desenhos de execução deste tipo de reforço devem ter a informação precisa da posição, da altura e da largura dos entalhes onde os laminados de CFRP serão inseridos. Além disso, devem conter informação sobre o posicionamento das armaduras existentes. No momento em que se está a proceder à abertura dos entalhes, além de garantir o especificado no projecto, é fundamental assegurar que não se provoquem danos nas armaduras existentes (longitudinais e transversais) que eventualmente estejam a ser atravessadas pelo entalhe.

De forma a proporcionar a melhor aderência possível na ligação betão-adesivo, deve ser garantido que a superfície de betão na zona dos entalhes esteja seca, isenta de gorduras e que não apresente partículas soltas. Assim, deve-se proceder à limpeza dos entalhes com a aplicação de ar comprimido e, previamente à aplicação do reforço, deve-se verificar se o betão se encontra seco. De forma a proporcionar as melhores condições de aderência entre o adesivo e o CFRP, as sujidades que eventualmente os laminados contenham (pó, gorduras, etc) devem ser removidas por intermédio da limpeza dos laminados com acetona. Um aspecto importante associado aos laminados é a necessidade, numa fase prévia à aplicação do reforço, da realização de ensaios para garantir que os valores das propriedades do material aplicado satisfazem os requisitos considerados na fase de projecto. O mesmo tipo de controlo deve ser feito nos restantes materiais intervenientes no reforço.

Junto do elemento estrutural a reforçar, deve ser colocado o número exacto de laminados a serem aplicados (controlo do número de laminados para não existir qualquer possibilidade de esquecimento de inserção de um CFRP). Por sua vez, o adesivo epoxídico deve ser produzido segundo as recomendações do fabricante, quer em termos das dosagens das suas duas componentes, no modo e tempo de mistura e no tempo prático de utilização (“pot-life”) do adesivo. Refira-se como boa prática a utilização do adesivo associado ao sistema de laminado adoptado. Durante a inserção do CFRP deve existir sempre a preocupação de evitar o aparecimento de bolhas de ar que comprometam as condições da ligação betão-adesivo-CFRP.

ii) Desempenho estrutural do reforço de CFRP

A investigação experimental realizada permitiu validar a técnica de reforço ao corte proposta nesta dissertação. A inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais de vigas de betão armado com rotura por corte resultou em aumentos de rigidez em

serviço e de capacidade máxima de carga em relação ao verificado nas vigas não reforçadas. O mesmo se passou em termos de flecha central última num número significativo de vigas ensaiadas com CFRP.

A instalação de um determinado estado de fendilhação no betão previamente à aplicação do reforço de CFRP, contendo fendas de corte, conduziu a que, até ao nível de carga de pré-fendilhação, os modelos reforçados nestas condições apresentassem menor rigidez do que a verificada nos modelos reforçados não pré-fendilhados. Após este patamar de carga, as curvas dos modelos pré-fendilhados foram, progressivamente, para níveis de carga próximos dos verificados nas curvas dos modelos não pré-fendilhados.

Além da comparação directa entre o comportamento de vigas com e sem o reforço de CFRP, a eficácia da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados foi comparada com a de outras duas formas alternativas de incrementar a capacidade resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado: uma recorrendo igualmente a materiais compósitos de CFRP, mas baseada na colagem externa de mantas; e outra adoptando a solução convencional em betão armado por intermédio da aplicação de um número de estribos de aço que, em fase de pré-dimensionamento, garanta a mesma capacidade de carga máxima das vigas reforçadas com CFRP.

Os modelos reforçados ao corte por inserção de laminados de CFRP registaram, em comparação com modelos em betão armado de resistência máxima equivalente, um acréscimo de rigidez em serviço, uma diminuição da flecha última e valores de carga máxima ligeiramente inferiores.

Uma análise comparativa do desempenho de duas soluções equivalentes de reforço ao corte com CFRP (uma aplicada usando a técnica da inserção de laminados e a outra aplicada usando a técnica da colagem externa de mantas) permitiu concluir que, independentemente da percentagem de estribos de aço e da percentagem de reforço de CFRP, os laminados inseridos proporcionaram um melhor desempenho das vigas reforçadas em termos de acréscimo de rigidez em serviço, de carga máxima na rotura e da flecha última na secção de aplicação da carga. Além disso, de um modo geral, registou-se um maior grau de mobilização do reforço de CFRP (extensões mais elevadas, pelo que maior desempenho do reforço) para as soluções com laminados.

Os modos de rotura que ocorreram nas vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos foram condicionados pelo tipo de betão. No programa experimental apresentado no Capítulo 4 foram essencialmente utilizados três tipos de betão. Para as duas classes de resistência do betão mais baixa, o modo de rotura que tipicamente ocorreu foi a cedência do reforço com destacamento de um volume de betão adjacente ao CFRP. Por este facto, nas vigas com a classe de betão mais baixa ($f_{cm} = 18.6$

MPa) a rotura ocorreu mais prematuramente do que no caso das vigas com o betão de resistência intermédia ($f_{cm} = 31.1/39.7$ MPa). Como consequência, o rendimento do CFRP foi menor, o que provocou um menor desempenho estrutural das vigas reforçadas. Para as vigas com o betão de melhor qualidade ($f_{cm} = 59.4$ MPa), em geral, o betão deixou de ser o elemento condicionante da cedência do CFRP, passando a eficácia da técnica a ser determinada pela ligação adesivo-CFRP (escorregamento do laminado) e, até mesmo, pela resistência à tracção do CFRP (rotura do laminado). Desta forma, em relação às vigas que foram fabricadas com betões mais fracos, registaram-se aumentos substancialmente superiores no rendimento do reforço de CFRP e no desempenho estrutural das vigas reforçadas.

Além do tipo de betão outro parâmetro que influencia os modos de rotura das vigas reforçadas é a percentagem de CFRP. O padrão de fendilhação foi tão mais difuso quanto mais elevada era a percentagem de CFRP. A presença de mais fendas de corte a atravessar os CFRP conduziu a uma fragilização das condições de aderência do reforço, e à tendência, em contraposição com o verificado nas menores percentagens de reforço, de uma diminuição dos comprimentos de amarração dos laminados. Enquanto no caso das vigas com a menor percentagem de CFRP se dá a cedência individualizada de cada laminado, nas vigas com percentagens elevadas de CFRP pode ocorrer um efeito de grupo que proporciona o destacamento de uma parede de betão contendo CFRP.

O modo de rotura registado nas vigas reforçadas com as percentagens mais elevadas de CFRP indicia que, para uma determinada solução de reforço ao corte, deve existir um limite mínimo para o espaçamento dos laminados, abaixo do qual não ocorre qualquer contributo em termos de capacidade resistente da viga. Se a limitação do espaçamento mínimo para laminados consecutivos é importante, não é menos importante a questão do espaçamento máximo a adoptar. Uma solução de reforço deve garantir que o CFRP seja atravessado pela fenda de rotura de corte. Além da imposição da existência de um número mínimo de laminados a atravessar a fenda de rotura de corte, a colocação do CFRP, em função da posição dos estribos de aço, deve ser outro aspecto a ser considerado de forma a ser obtida a distribuição o mais homogénea possível dos elementos resistentes ao esforço transversal (laminados de CFRP e estribos de aço).

A avaliação do efeito dos parâmetros como a classe de resistência do betão, a orientação e percentagem do CFRP, e a percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica de reforço em estudo foi feita a dois níveis: o primeiro, em termos do acréscimo de força máxima registado nas vigas reforçadas quando tomada por comparação a força máxima da viga sem CFRP (análise feita ao longo do Capítulo 4); o segundo, em termos da contribuição do CFRP (V_f) na resistência ao esforço transversal (análise feita ao longo do Capítulo 5). Esta dupla análise é justificada pelo facto de se ter

constatado que o acréscimo de carga máxima proporcionado pela solução de reforço de CFRP (diferença entre a força máxima da viga com e sem CFRP), em algumas das vigas ensaiadas, não ter sido proporcional à contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal. Com efeito, a aplicação do reforço de CFRP, em algumas das vigas ensaiadas, conduziu a uma mudança do posicionamento da fenda de rotura de corte, o que provocou uma diminuição da mobilização da armadura transversal existente, em relação à que esta teve no caso da viga sem CFRP. Apesar desta ocorrência, em ambas as análises foi possível verificar que a efectividade de uma solução de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos aumenta com a qualidade do betão das vigas e com a percentagem de CFRP. Além disso, os laminados inclinados a 45° e a 60° tiveram melhor desempenho que a solução de laminados verticais. A aplicação das mesmas soluções de CFRP a vigas que se distinguíam pela percentagem de armadura transversal existente permitiu concluir que existe uma diminuição da efectividade do reforço de CFRP com o aumento da percentagem de armadura transversal.

iii) Formulação analítica para o cálculo da extensão efectiva do CFRP

Após a realização de um vasto programa experimental, onde foram avaliados alguns dos factores que mais influenciam o comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados inseridos, procedeu-se ao desenvolvimento de uma equação que traduza a efectividade expectável para uma determinada solução de reforço de CFRP. À semelhança do adoptado nas propostas de dimensionamento para o reforço ao corte de vigas de betão armado com materiais compósitos de CFRP aplicados segundo a técnica da colagem externa, apresentadas pelo American Concrete Institute (ACI Committee 440, 2002) e pela Fédération Internationale du Béton (*fib* - Bulletin 14, 2001), o parâmetro adoptado para a simulação do nível de mobilização do CFRP na altura da rotura da viga foi a designada extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}).

Tendo por base os resultados da investigação experimental realizada foi definida uma equação que permite obter a referida extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}) em função da percentagem e orientação dos laminados de CFRP, da classe de resistência do betão e da percentagem de armadura transversal existente. Concretamente, a equação desenvolvida depende da orientação do reforço (θ_f) e do parâmetro $(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / (f_{cm}^{2/3})$, o qual engloba a percentagem de CFRP (ρ_f), a percentagem de armadura transversal existente (ρ_{sw}) e a qualidade do betão (f_{cm}).

Na validação da equação anteriormente referida, houve necessidade de introduzir um factor de incerteza relativo ao desempenho do CFRP, designado por γ_f . A condição imposta para a obtenção

deste factor foi que a relação entre o valor experimental e o valor analítico da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f) fosse em cerca de 95% das vigas analisadas igual ou superior à unidade (imposição da segurança). Esta condição conduziu a um factor γ_f de valor igual a 1.3.

7.2 - DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar de se considerar que os objectivos da presente dissertação foram, de um modo geral, alcançados, existem aspectos que devem ser tratados em trabalhos futuros, de forma a incrementar o nível de conhecimento do comportamento estrutural de vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos. Assim, os desenvolvimentos futuros devem contemplar os seguintes aspectos:

- Verificação experimental do efeito da relação a/d na eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo. Além disso, também, deve ser alargada a base de dados com resultados experimentais referentes ao comportamento de vigas de betão armado pré-fendilhadas antes da aplicação do reforço de CFRP.
- Avaliação do efeito que a presença do CFRP pode introduzir no nível de mobilização da armadura transversal existente, tendo como base o contributo que a referida armadura tem no caso da viga de referência sem CFRP.
- Verificação experimental do efeito de um carregamento repetido no comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados inseridos.
- Avaliação das consequências em termos da resistência final ao esforço transversal de uma viga de betão armado reforçada ao corte com CFRP inserido no caso de algum ou alguns dos estribos existentes necessitarem de ser cortados para a colocação dos laminados.
- Avaliação da repercussão da componente a “longo prazo” nas propriedades físicas, mecânicas e químicas do reforço de CFRP em face de ensaios acelerados em laboratório ao nível da durabilidade, da história de carga e do comportamento ao fogo.
- Definição de um modelo numérico, baseado na técnica dos elementos finitos, para simular o comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte por intermédio da inserção de laminados de CFRP.
- Simulação numérica utilizando um programa de análise não linear material, com o objectivo de quantificar a influência que os parâmetros, anteriormente indicados, têm na eficácia da técnica de reforço investigada, bem como detectar e quantificar a influência de outros parâmetros não estudados nesta dissertação.

Capítulo 8

Referências bibliográficas

- ACI 440R-96, 1996, “*State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures*”, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 440, 68 pp.
- ACI Committee 440, 2002, “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 440, 118 pp.
- Adhikary, B.B., Mutsuyoshi H. e Ashraf, M., 2004, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer sheets with bonded anchorage*”, ACI Structural Journal, vol. 101, nº5, September-October, pp. 660-668.
- Appleton, J. e Gomes, A., 1997, “*Reforço de estruturas de betão armado por adição de armaduras exteriores*”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, nº41, Janeiro, pp. 15-20.
- Asplund, S.O., 1949, “*Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement*”, Journal of the American Concrete Institute, vol. 20, nº6, pp. 397-406.
- Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Riskalla, S.H. e Triantafillou, T.C., 2002, “*Fiber-reinforced polymer composites for construction – State-of-the-art review*”, Journal of Composites for Construction, vol. 6, nº2, May, pp. 73-87.
- Barnes, R. e Fidell, J., 2006, “*Performance in fire of small-scale CFRP strengthened concrete beams*”, Journal of Composites for Construction, vol. 10, Issue 6, November/December, pp. 503-508.
- Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J.M., Dias, S.J.E., Ferreira, D.R.S.M. e Fortes, A.S., 2003, “*Investigação no âmbito da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão*”, Vº Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto (CD-ROM), São Paulo, Brasil, Junho.
- Barros, J.A.O., Dias, S.J.E. e Fortes, A.S., 2005, “*Near surface mounted technique for the flexural and shear strengthening of concrete beams*”, Proceedings of the INCOS 05 - International Conference on Concrete for Structures, Coimbra, Portugal, July 7-8, pp. 229-236.
- Barros, J.A.O., Dias, S.J.E. e Lima J.L.T., 2007, “*Efficacy of CFRP-BASED techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams*”, Journal Cement & Concrete Composites, nº29, January, pp. 203-217.
- Barros, J.A.O., Bonaldo, E. e Oliveira, J.T., 2007, “*Composite materials for the structural strengthening of reinforced masonry shells*”, Proceedings of ACIC 07, Advanced Composites in Construction, 2-4 April, University of Bath, UK.
- Basler, M., White, D. e Desroches, M., 2003, “*Shear strengthening with bonded CFRP L-shaped plates*”, Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, ACI International SP-215, Editors: Sami Rizkalla and Antonio Nanni, pp. 373-384.
- Belbetões, 2002, “*Remodelação do edifício do Marquês de Pombal, nº12, Lisboa*”, Ficha técnica.
- Bettor MBT Portugal, 1999, “*Sistema Compósito MBrace*”, Fichas técnicas, Lisboa.
- Bettor MBT, 2003, “*BeTTor MBT - MBrace: Sistema integral para refuerzo de estructuras*”, Bettor MBT - Productos Químicos para la Construcción, Abril, 8 pp.

- Blaschko, M. e Zilch, K., 1999, “*Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits*”, Proceedings of the Twelfth International Conference of Composite Materials, ICCM 12, Paris, France (CD-ROM).
- Blaschko, M., 2003, “*Bond behaviour of CFRP strips glued into slits*”, 6th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6), Singapore, pp. 205-214.
- Bonaldo, E., Barros, J.A.O. e Lourenço, P.B., 2007, “*Influence of the spacing between NSM-CFRP laminates on the flexural strengthening efficacy of RC slabs*”, 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, Grécia, 16 - 18 de Julho (CD-ROM).
- Borchert, K. e Zilch, K., 2007, “*A general bond stress-slip relationship for NSM FRP strips*”, 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, Grécia, 16 - 18 de Julho (CD-ROM).
- Bousselham, A. e Chaallal, O., 2004, “*Shear strengthening reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer: assessment of influencing parameters and required research*”, ACI Structural Journal, vol. 101, nº 2, March-April, pp. 219-227.
- Bousselham, A. e Chaallal, O., 2006-a, “*Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP*”, Composites Part B, vol. 37, pp. 37-46.
- Bousselham, A. e Chaallal, O., 2006-b, “*Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer – an experimental study*”, ACI Structural Journal, vol. 103, nº 3, May-June, pp. 339-347.
- Cao, S.Y., Chen, J.F., Teng, J.G., Hao, Z. e Chen, J., 2005, “*Debonding in reinforced concrete beams shear strengthened with complete fiber reinforced polymer wraps*”, Journal of Composites for Construction, vol. 9, nº5, September/October, pp.417-428.
- Carolin, A., 2003, “*Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*”, Doctoral Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Suécia, June, 190 pp.
- Casadei, P., Galati, N., Parreti, R. e Nanni, A., 2003, “*Strengthening of a bridge using two FRP technologies*”, Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, ACI International SP-215, Editors: Sami Rizkalla and Antonio Nanni, American Concrete Institute, pp. 219-237.
- Chaallal, O., Nollet, M.J. e Perraton D., 1998, “*Shear strengthening of RC beams by externally bonded side CFRP Strips*”, Journal of Composites for Construction, vol. 2, nº2, May, pp. 111-113.
- Chaallal, O., Shahawy, M. e Hassan M., 2002, “*Performance of reinforced concrete T-girders strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer fabric*”, ACI Structural Journal, vol. 99, nº 3, May-June, pp. 335-343.
- Concrete Society, 2000, “*Design guidance on strengthening concrete structures using fibre composite materials*”, Technical Report 55, The Concrete Society, London, UK, 70 pp.
- CSA-S806-02, 2002, “*Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers*”, 1st ed., Canadian Standards Association, Toronto, Canada.
- Degussa Construction Chemicals Portugal, 2003, “*Fichas técnicas MBrace Resin 50, MBrace Resin 55 e MBrace Resin 220*”, Maio.
- De Lorenzis, L. e Nanni, A., 2001, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods*”, ACI Structural Journal, vol. 98, nº1, January-February, pp. 60-68.

- De Lorenzis, Laura, 2002, "*Strengthening of RC structures with near-surface mounted FRP rods*", PhD Dissertation of Civil Engineering, Università Degli Studi di Lecce, Italy, May, 289 pp.
- De Lorenzis, L. e Teng, J.G., 2007, "*Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures*", *Composites Part B*, vol. 38, pp. 119-143.
- Deniaud, C. e Cheng, J.J.R., 2001, "*Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets*", *ACI Structural Journal*, vol. 98, nº3, May-June, pp. 386-394.
- Deniaud, C. e Cheng, J.J.R., 2003, "*Reinforced concrete T-beams strengthened in shear with fiber reinforced polymer sheets*", *Journal of Composites for Construction*, vol. 7, nº4, November, pp. 302-310.
- Dias, S.J.E., 2001, "*Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, Março, 203 pp.
- Dias, S.J.E., Juvandes, L.F.P. e Figueiras, J.A., 2002, "*Comportamento experimental de vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP do tipo MBrace*", Relatório Técnico FEUP, Janeiro, 34 pp.
- Dias, S.J.E., Juvandes, L. e Figueiras, J.A., 2006, "*Estruturas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas de CFRP*", *Revista IBRACON de Estruturas*, vol. 2, nº2, Junho, pp. 252-275.
- Di Ludovico, M., Nanni, A., Prota, A. e Cosenza, E., 2005, "*Repair of bridge girders with composites: experimental and analytical validation*", *ACI Structural Journal*, vol. 102, nº5, September-October, pp. 639-648.
- Dimande, A.O., 2003, "*Influência da interface no reforço à flexão de estruturas de betão com sistemas FRP*", Tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Dezembro, Porto, 200 pp.
- Eden, R., Fallis, G.J., Kim, Y.J., Bizindavyi, L. e Green, M.F., 2004, "*Damaged bridge girder repaired using prestressed CFRP sheets*", *IIFC FRP International - The official newsletter of the International Institute for FRP in Construction*, vol. 1, Issue 2, August.
- El-Hacha, R. e Riskalla, S.H., 2004, "*Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures*", *ACI Structural Journal*, vol. 101, nº5, September-October, pp. 717-726.
- Emmons, P., Thomas, J. e Sabnis, G.M., 2001, "*New strengthening technology for blue circle cement silo repair and upgrade*", *Proceedings of FRP workshop US-AID*, Cairo, Egipto.
- EMPA, 1998, "*Testing of CFRP shear strips on reinforced concrete T-beams (T1 e T2)*", Report nº 169'219E/1 do Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 39 pp.
- EMPA, 2002, "*Shear strengthening of reinforced concrete with CFRP L-shaped plates*", *EMPA Activities 2002*, Material and systems for civil engineering.
- EN 206-1, 2000, "*Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*", European standard, CEN, 69 pp.
- EN 10002-1, 1990, "*Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)*", European standard, CEN, 35 pp.
- Eurocomp, 1996, "*Structural design of polymer composites - EUROCOMP design code and handbook*", the European Structural Polymeric Composites Groups, editado por John L. Clarke, E & FN Spon, ISBN 0419194509, Londres, 751 pp.

- Fardis, M.N. e Khalili, H., 1981, “Concrete encased in fiberglass reinforced plastic”, ACI Journal, 78(6), pp. 440-446.
- Ferreira, D.R.S.M., 2000, “Pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- fib - Bulletin 14, 2001, “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”, Technical report by Task Group 9.3 FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, Fédération Internationale du Béton - fib, July, 130 pp.
- Fortes, A.S., Barros, J.A.O. e Padaratz, I.J., 2002, “Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento”, Relatório 02-DEC/E-13, Universidade do Minho, Junho, 32 pp.
- Fortes, A.S., 2004, “Estruturas de Concreto submetidas à flexão reforçadas com laminados de CFRP colados em entalhes”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- FRPRCS8, 2007, Proceedings of the 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Patras, Grécia, 16 a 18 de Julho (CD-ROM).
- Funakawa, I., Shimono, K., Watanabe, T., Asada, S. e Ushijima, S., 1997, “Experimental study on shear strengthening with continuous fiber reinforcement sheet and methyl methacrylate resin”, Proceedings of the Third International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, pp. 475-482.
- Gomes, A. e Appleton, J., 1997, “Reforço de estruturas de betão por encamisamento das secções”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, nº42, Setembro, pp. 7-17.
- Hogue, T., Cornforth, R.C. e Nanni, A., 1999, “Myriad convention center floor system reinforcement”, Proceedings of the FRPRCS-4, C.W. Dolan, S. Rizkalla and A. Nanni Editors, ACI, pp. 1145-1161.
- ISO 527-5, 1997, “Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites”, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp.
- Jayaprakash, J., Samad, A., Abbasovich, A. e Ali, A., 2007, “Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips”, Construction and Building Materials (www.sciencedirect.com).
- JSCE, 2001, “Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets”, Japan Society of Civil Engineers, Japão, Abril 2001.
- Juvandes, L., 1999, “Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, Setembro, 400 pp.
- Juvandes, L., Dias, S.J.E. e Figueiras, J.A., 2003, “Eficiência do reforço de faixas de laje com sistemas compósitos de CFRP”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, nº52, Setembro, pp. 33-42.
- Katsumata, H., Kobatake, Y. e Takeda, T., 1987, “A study on the strengthening with carbon fiber for earthquake-resistant capacity of existing reinforced concrete columns”, Proceedings Workshop on Repair and Retrofit of Existing Structures, Tsukuba, Japan, pp. 1816-1823.
- Khalifa, Ahmed, 1999, “Shear performance of reinforced concrete beams strengthened with advanced composites”, PhD Thesis, Structural Engineering Department, Alexandria University, Egypt.

- Khalifa, A. e Nanni, A., 2000, "*Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites*", Journal Cement & Concrete Composites, vol. 22, nº2, pp. 165-174.
- Khalifa, A. e Nanni A., 2002, "*Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites*", Construction and Building Materials, vol. 16, nº3, pp. 135-146.
- Kotynia, R., 2007, "*Analysis of the flexural response of NSM FRP-strengthened concrete beams*", 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, Grécia, 16 - 18 de Julho (CD-ROM).
- Meier, U., 1987, "*Bridge repair with high performance composite materials*", Material und Technik, vol. 15, nº4, pp. 125-128.
- Meier, U., 2004, "*External strengthening and rehabilitation: where from - where to?*", IIFC FRP International - The official newsletter of the International Institute for FRP in Construction, vol. 1, Issue 2, August.
- Mitsui, Y., Murakami, K., Takeda, K. e Sakai, H., 1998, "*A study on shear reinforcement of reinforced concrete beams externally bonded with carbon fiber sheets*", Composite Interfaces, vol. 5, nº4, pp. 285-295.
- Miyauchi, K., Inoue, S., Nishibayashi, S. e Tanaka, Y., 1997, "*Shear behavior of reinforced concrete beam strengthened with CFRP sheet*", Transactions of the Japan Concrete Institute, vol.19, pp. 97-104.
- Nanni, A., 2004, "*Fiber reinforced polymer composites for infrastructure strengthening - From research to practice*", VII AIMAT Congress, Ancona, Italy, June 29 - July 2, Key-note Paper KP2, 10 pp. (CD-ROM).
- Nordin, H. e Taljsten, B., 2006, "*Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP*", Journal of Composites for Construction, vol. 10, nº1, January/February, pp. 60-68.
- Oehlers, D.J., Rashid, R. e Seracino, R., 2007, "*IC debonding resistance of groups of FRP NSM strips in reinforced concrete beams*", Journal Construction and Building Materials (www.sciencedirect.com).
- Pellegrino, C. e Modena, C., 2002, "*Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement*", Journal of Composites for Construction, vol. 6, nº2, May, pp. 104-111.
- Pellegrino, C. e Modena, C., 2006, "*Fiber-reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams: experimental study and analytical modeling*", ACI Structural Journal, vol. 103, nº5, September-October, pp. 720-728.
- Rashid, R., Oehlers, D.J. e Seracino, R., 2008, "*IC debonding of FRP NSM and EB retrofitted concrete: plate and cover interaction tests*", Journal of Composites for Construction, vol. 12, nº2, March/April, pp. 160-167.
- REBAP, 1983, "*Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado*", Decreto-Lei nº 349-C/83 de 30 de Julho, edição Porto Editora, Porto, 211 pp.
- Rostasy, F.S., 1987, "*Bonding of steel and GFRP plates in the area of coupling joints. Talbrücke Kattenbusch*", Research Report nº 3126/1429, Federal Institute for Materials Testing, Braunschweig, Germany.
- Sato, Y., Ueda, T., Kakuta, Y. e Tanaka, T., 1996, "*Shear reinforcing effect of carbon fiber sheet attached to side of reinforced concrete beam*", Advanced Composite Materials in Bridges, M.M. El-Badry, ed., CSCE, Montreal, Quebec, Canada, pp. 621-637.
- Sato, Y., Ueda, T., Kakuta, Y., e Ono, S., 1997, "*Ultimate shear capacity of reinforced concrete beams with carbon fiber sheet*", Proceedings of the Third International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, pp. 499-506.

- Sena-Cruz, J.M. e Barros, J.A.O., 2002, “*Bond behavior of carbon laminate strips into concrete by pullout-bending tests*”, Bond in Concrete - from the research to standards, International Symposium, November, Hungry, pp. 614-621.
- Sena-Cruz, J.M., 2004, “*Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips*”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Sena-Cruz, J.M. e Barros, J.A.O., 2004, “*Bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete in structural strengthening*”, Journal of Composites for Construction, vol. 8, nº 6, pp. 519-527.
- S&P, 2002, “*Design guide line for S&P FRP systems*”, S&P Clever Reinforcement Company, Switzerland, 69 pp.
- Sika, 2000, “*Soluções com sistemas Sika: Sika® CarboDur® e Sika Wrap®. Reforço estrutural e sísmico.*”, Sika - Indústria Química, S.A., Junho, 16 pp.
- Sika, 2001, Fichas técnicas 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34, <http://www.sika.pt>.
- Sika® CarboShear L®, 2003, *Système de renforcement à l'effort tranchant à haute résistance en PRFC*, Notice technique, Sika Schweiz AG, Suíça.
- Taerwe, L., Khalil, H. e Matthys, S., 1997, “*Behaviour of RC beams strengthened in shear by external CFRP sheets*”, Proceedings of the Third International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, pp. 483-490.
- Taljsten, B., 1997, “*Strengthening of concrete structures for shear with bonded CFRP-fabrics*”, Proceedings of the USA-Canada-Europe Workshop on Bridge Engineering, U. Meir and R. Betti, eds., Zurich, Switzerland, July 14-15, pp. 57-64.
- Teng, J.G., De Lorenzis, L., Wang, B., Li, R., Wong, T.N. e Lam, L., 2006, “*Debonding failures of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips*”, Journal of Composites for Construction, vol. 10, nº 2, March/April, pp. 92-105.
- TML, 2004, Tokio Sokki Kenkyujo Co., Ltd., Strain Gauges, <http://www.tml.jp>.
- Triantafillou, T.C., 1998, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites*”, ACI Structural Journal, vol. 95, nº2, March-April, pp. 107-115.
- Triantafillou, T.C. e Antonopoulos C.P., 2000, “*Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP*”, Journal of Composites for Construction, vol. 4, nº4, November, pp. 198-205.
- Uji, K., 1992, “*Improving shear capacity of existing reinforced concrete members by applying carbon fiber sheets*”, Transactions of the Japan Concrete Institute, vol.14, pp.253-266.
- Umezu, K., Fujita, M., Nakai, H. e Tamaki, K., 1997, “*Shear behavior of RC beams with aramid fiber sheet*”, Proceedings of the Third International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), JCI, Japão, pp. 491-498.

ANEXO A - Pré-dimensionamento dos modelos

1. Série de vigas rectangulares (Capítulo 3)

A resistência ao esforço transversal das vigas ensaiadas foi materializada recorrendo a quatro distintos sistemas de reforço. Um utilizando estribos de aço convencionais e os restantes adoptando compósitos de CFRP unidireccionais. Nestes últimos, recorreu-se a faixas discretas de manta de CFRP, em forma de U, coladas externamente e a laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas (verticais e inclinados a 45°). A quantidade de reforço nos vários sistemas utilizados foi determinada por forma a que o modo de ruína dos elementos fosse por corte e para valores de cargas semelhantes. Na Tabela A.1 apresentam-se os valores das características dos materiais considerados no pré-dimensionamento dos reforços.

Tabela A.1 - Características dos materiais (valores de pré-dimensionamento).

Betão	Resistência à compressão: 38 MPa		
Aço	Tensão de cedência das armaduras: 500 MPa		
Manta de CFRP	Módulo de elasticidade: 390 GPa	Extensão última: 0.8 %	Espessura: 0.167 mm*
Laminado de CFRP	Módulo de elasticidade: 160 GPa	-	Espessura: 1.4 mm

* Espessura efectiva (manta com 300 g/m²).

i) Quantificação da carga de rotura das vigas: modo de rotura por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$)

• Vigas da série A

Na Figura A.1 apresenta-se o modelo estrutural e as secções transversais das vigas da série A. O momento resistente de cada tipo de secção de betão armado foi determinado por intermédio de:

$$M_{res.} \cong A_{sl} \times f_{sy} \times 0.85 d_s \quad (A.1)$$

em que A_{sl} é a quantidade de armadura longitudinal na face traccionada da viga, f_{sy} é a tensão de cedência do aço da armadura e d_s é a altura útil da secção de betão armado. A carga de rotura, por flexão, das vigas da série A foi obtida por via da seguinte expressão:

$$F_{rotura}^{flexão} = \frac{M_{res.}}{0.3} \quad (A.2)$$

Na Tabela A.2 apresentam-se, para as vigas da série A, os valores do momento resistente ($M_{res.}$) e da carga previsível de rotura por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$).

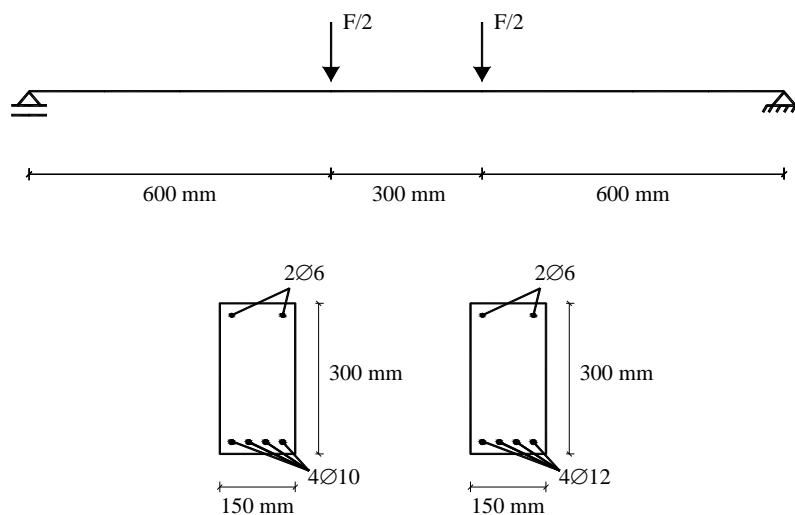


Figura A.1 - Modelo estrutural e as secções transversais das vigas da série A.

Tabela A.2 - Previsão da carga total de rotura por flexão das vigas da série A.

Armaduras longitudinais	Dados	$M_{res.}$ [kN.m]	$F^{flexão}_{rotura}$ [kN]
Vigas com 4Ø10 longitudinais	$A_{sl} = 3.14 \text{ cm}^2$	36.57	121.9
	$f_{sy} = 500 \text{ MPa}$		
	$d_s = 0.274 \text{ m}$		
Vigas com 4Ø12 longitudinais	$A_{sl} = 4.52 \text{ cm}^2$	52.44	174.8
	$f_{sy} = 500 \text{ MPa}$		
	$d_s = 0.273 \text{ m}$		

• Vigas da série B

Na Figura A.2 apresenta-se o modelo estrutural e as secções transversais das vigas da série B.

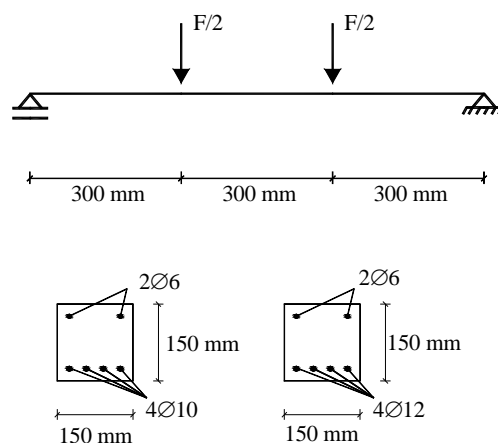


Figura A.2 - Modelo estrutural e as secções transversais das vigas da série B.

O momento resistente de cada tipo de secção de betão armado é obtido por via da expressão (A.1). A carga total de rotura, por flexão, das vigas da série B é obtida por intermédio da seguinte expressão:

$$F_{rotura}^{flexão} = \frac{M_{res.}}{0.15} \quad (A.3)$$

Na Tabela A.3 apresentam-se, para as vigas da série B, os valores do momento resistente ($M_{res.}$) e da carga total previsível de rotura por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$).

Tabela A.3 - Previsão da carga de rotura por flexão das vigas da série B.

Armaduras longitudinais	Dados	$M_{res.}$ [kN.m]	$F_{rotura}^{flexão}$ [kN]
Vigas com 4φ10 longitudinais	$A_{sl} = 3.14 \text{ cm}^2$	16.55	110.3
	$f_{sy} = 500 \text{ MPa}$		
	$d_s = 0.124 \text{ m}$		
Vigas com 4φ12 longitudinais	$A_{sl} = 4.52 \text{ cm}^2$	23.63	157.5
	$f_{sy} = 500 \text{ MPa}$		
	$d_s = 0.123 \text{ m}$		

ii) Quantificação dos estribos de aço verticais para as vigas reforçadas ao corte com armaduras convencionais.

A contribuição do betão para a resistência ao esforço transversal das vigas de betão armado foi obtida por intermédio da expressão (REBAP, 1983):

$$V_c = \tau_1 \times b_w \times d_s \quad (A.4)$$

A contribuição de estribos de aço colocados verticalmente para a resistência ao esforço transversal das vigas de betão armado foi obtida por via da expressão (REBAP, 1983):

$$V_s = 0.9 \times d_s \times \frac{A_{sw}}{s} \times f_{sy} \quad (A.5)$$

O valor do esforço transversal resistente da secção é o somatório dos valores resultantes das expressões (A.4) e (A.5), ou seja:

$$V_{res.} = V_c + V_s \quad (A.6)$$

A carga de rotura das vigas, por corte, vale duas vezes o valor obtido com a expressão (A.6), ou seja:

$$F_{rotura}^{corte} = 2 \times V_{res.} \quad (A.7)$$

• Vigas da série A

No grupo de vigas da série A que continham 4 ϕ 10 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao esforço transversal por intermédio de estribos de aço verticais (2 ramos) com 6 mm de diâmetro e espaçados de 300 mm (A10_S). Assim, para a viga A10_S os cálculos efectuados foram os seguintes:

a) Contribuição do betão para a resistência ao esforço transversal:

$$V_c = 850 \times 0.15 \times 0.274 = 34.94 \text{ kN};$$

b) Contribuição dos estribos de aço para a resistência ao esforço transversal:

$$V_s = 0.9 \times 0.274 \times \frac{0.5655 \times 10^{-4}}{0.3} \times 500000 = 23.24 \text{ kN};$$

c) Valor do esforço transversal resistente da secção:

$$V_{res.} = V_c + V_s = 34.94 + 23.24 = 58.18 \text{ kN};$$

d) Valor da carga de rotura por corte da viga A10_S:

$$F_{rotura}^{corte} = 2 \times 58.18 = 116.4 \text{ kN} \leq F_{rotura}^{flexão} = 121.9 \text{ kN} \quad (\Rightarrow \text{rotura da viga por corte}).$$

No grupo de vigas da série A que continham 4 ϕ 12 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao esforço transversal através de estribos de aço verticais (2 ramos) com 6 mm de diâmetro e espaçados de 150 mm (A12_S). Assim, para a viga A12_S os cálculos efectuados foram os seguintes:

a) Contribuição do betão para a resistência ao esforço transversal:

$$V_c = 850 \times 0.15 \times 0.273 = 34.81 \text{ kN};$$

b) Contribuição dos estribos de aço para a resistência ao esforço transversal:

$$V_s = 0.9 \times 0.273 \times \frac{0.5655 \times 10^{-4}}{0.15} \times 500000 = 46.31 \text{ kN};$$

c) Valor do esforço transversal resistente da secção:

$$V_{res.} = V_c + V_s = 34.81 + 46.31 = 81.12 \text{ kN};$$

d) Valor da carga de rotura por corte da viga A12_S:

$$F_{rotura}^{corte} = 2 \times 81.12 = 162.2 \text{ kN} \leq F_{rotura}^{flexão} = 174.8 \text{ kN} \quad (\Rightarrow \text{rotura da viga por corte}).$$

• Vigas da série B

No grupo de vigas da série B que continham 4 ϕ 10 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao esforço transversal através de estribos de aço verticais (2 ramos) com 6 mm de diâmetro e espaçados de 150 mm (B10_S). Assim, para a viga B10_S os cálculos efectuados foram os seguintes:

a) Contribuição do betão para a resistência ao esforço transversal:

$$V_c = 850 \times 0.15 \times 0.124 = 15.81 \text{ kN};$$

b) Contribuição dos estribos de aço para a resistência ao esforço transverso:

$$V_s = 0.9 \times 0.124 \times \frac{0.5655 \times 10^{-4}}{0.15} \times 500000 = 21.04 \text{ kN};$$

c) Valor do esforço transverso resistente da secção:

$$V_{res.} = V_c + V_s = 15.81 + 21.04 = 36.85 \text{ kN};$$

d) Valor da carga de rotura por corte da viga B10_S:

$$F_{rotura}^{corte} = 2 \times 36.85 = 73.7 \text{ kN} \leq F_{rotura}^{flexão} = 110.3 \text{ kN} \quad (\Rightarrow \text{rotura da viga por corte}).$$

No grupo de vigas da série B que continham 4 ϕ 12 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao esforço transverso através de estribos de aço verticais (2 ramos) com 6 mm de diâmetro e espaçados de 75 mm (B12_S). Assim, para a viga B12_S os cálculos efectuados foram os seguintes:

a) Contribuição do betão para a resistência ao esforço transverso:

$$V_c = 850 \times 0.15 \times 0.123 = 15.68 \text{ kN};$$

b) Contribuição dos estribos de aço para a resistência ao esforço transverso:

$$V_s = 0.9 \times 0.123 \times \frac{0.5655 \times 10^{-4}}{0.075} \times 500000 = 41.73 \text{ kN};$$

c) Valor do esforço transverso resistente da secção:

$$V_{res.} = V_c + V_s = 15.68 + 41.73 = 57.41 \text{ kN};$$

d) Valor da carga de rotura por corte da viga B12_S:

$$F_{rotura}^{corte} = 2 \times 57.41 = 114.8 \text{ kN} \leq F_{rotura}^{flexão} = 157.5 \text{ kN} \quad (\Rightarrow \text{rotura da viga por corte}).$$

Na Tabela A.4 apresentam-se, resumidamente, os resultados do pré-dimensionamento das vigas reforçadas ao corte com estribos de aço verticais.

Tabela A.4 - Resultados do pré-dimensionamento das vigas reforçadas ao corte com estribos de aço verticais.

Série de vigas	Armaduras longitudinais	$F_{rotura}^{flexão}$ [kN]	Vigas reforçadas com estribos de aço		
			Designação	Quantidade de estribos	F_{rotura}^{corte} * [kN]
A	4 ϕ 10	121.9	A10_S	ϕ 6//300	116.4 (1.05)
	4 ϕ 12	174.8	A12_S	ϕ 6//150	162.2 (1.08)
B	4 ϕ 10	110.3	B10_S	ϕ 6//150	73.7 (1.50)
	4 ϕ 12	157.5	B12_S	ϕ 6//75	114.8 (1.37)

* Os valores entre parêntesis referem-se à relação entre a carga de rotura por flexão e a carga de rotura por corte.

iii) Quantificação do reforço para as vigas reforçadas ao corte com faixas de mantas de CFRP coladas externamente.

Para o reforço ao corte recorrendo à colagem externa de mantas de CFRP unidireccionais foi pré-estabelecido que se adoptaria, em termos de distribuição do CFRP, a forma de reforço discreta (Figura A.3). O reforço foi materializado por intermédio da colagem de duas camadas de faixas de manta de CFRP, em forma de U, com uma largura de 25 mm ($w_f = 25$ mm).

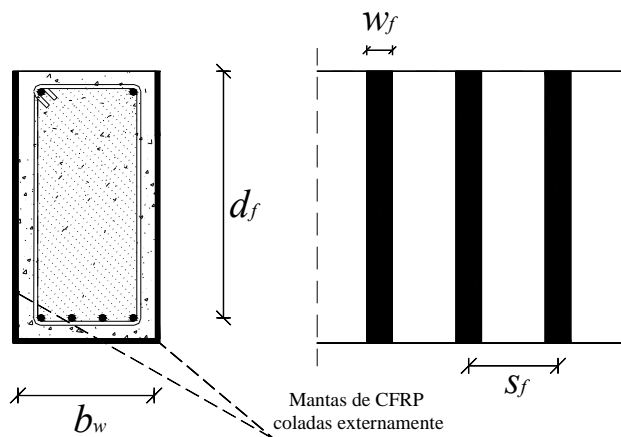


Figura A.3 - Reforço ao corte com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente.

O pré-dimensionamento da quantidade de reforço de CFRP determinou o espaçamento das faixas de manta, s_f , de tal forma que a contribuição do CFRP, na resistência ao esforço transversal das vigas de betão armado, fosse igual à conferida pelos estribos de aço verticais, anteriormente determinada. Seguindo a proposta do *ACI* (ACI Committee 440, 2002) para a contabilização da resistência ao esforço transversal dos compósitos de CFRP apresentam-se de seguida os passos que conduziram à obtenção da quantidade de reforço de manta de CFRP.

• Vigas da série A

No grupo de vigas da série A que continham 4 ϕ 10 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao esforço transversal com faixas de manta de CFRP (duas camadas) com 25 mm de largura (A10_M). O pré-dimensionamento do reforço desta viga consistiu na determinação do espaçamento das faixas de manta, s_f , de tal forma que a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal da viga A10_M fosse igual à contribuição dos estribos de aço da viga A10_S (estribos verticais de dois ramos com aço de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm), concretamente, 23.24 kN. Assim, os cálculos efectuados foram os seguintes:

a) *Cálculo da extensão efectiva do CFRP:*

- . Determinação da altura útil do reforço, d_f : $d_f = 274$ mm;
- . Parâmetro $nt_f E_f$: $nt_f E_f = 2 \times 0.000167 \times 3900000000 = 130260$ kN/m;
- . Parâmetro $L_e = \frac{23.3}{(nt_f E_f)^{0.58}}$: $L_e = \frac{23.3}{(130260)^{0.58}} = 25.16$ mm;
- . Parâmetro $k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3}$: $k_1 = \left(\frac{38}{27}\right)^{2/3} = 1.256$;
- . Parâmetro $k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f}$: $k_2 = \frac{274 - 25.16}{274} = 0.908$;
- . Parâmetro $k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11.9 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75$: $k_v = \frac{1.256 \times 0.908 \times 25.16^{-3}}{11.9 \times 0.008} = 0.301 \leq 0.75$;
- . Extensão efectiva no CFRP, $\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu}$: $\varepsilon_{fe} = 0.301 \times 0.008 = 0.00241$,
ou seja, $\varepsilon_{fe} = 0.00241 \leq 0.004$ (valor máximo admissível para a extensão efectiva).

b) *Cálculo da tensão efectiva do CFRP*

A tensão efectiva no CFRP, f_{fe} , foi obtida multiplicando o módulo de elasticidade do compósito, E_f , pela extensão longitudinal efectiva no CFRP, ε_{fe} . Assim, o valor adoptado para a tensão efectiva no CFRP foi de $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 3900000000 \times 0.00241 = 939.9$ MPa.

c) *Cálculo do espaçamento das faixas de manta de CFRP*

Tal como se referiu anteriormente, o espaçamento das faixas de manta de CFRP foi obtido impondo que a contribuição dos CFRP para a resistência ao esforço transversal, V_f , fosse igual a 23.24 kN. Assim:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f}{s_f} = 23.24 \text{ kN},$$

ou seja,

$$s_f = \frac{[4 \times (0.000167) \times 0.025] \times 939900 \times 0.274}{23.24} = 0.185 \text{ m}.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, na viga A10_M foram consideradas para o reforço ao corte faixas com duas camadas de manta de CFRP com 25 mm de largura e espaçadas de 190 mm.

No grupo de vigas da série A que continham 4 ϕ 12 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao esforço transversal com faixas de manta de CFRP (duas camadas) com 25 mm de largura (A12_M). O pré-dimensionamento do reforço desta viga consistiu na determinação do espaçamento das faixas de manta, s_f , de tal forma que a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal da viga A12_M fosse igual à contribuição dos estribos de aço da viga A12_S (estribos verticais de dois ramos com aço de 6 mm de diâmetro espaçados de 150 mm), concretamente, 46.31 kN. Assim, os cálculos efectuados foram os seguintes:

a) *Cálculo da extensão efectiva do CFRP:*

. Determinação da altura útil do reforço, d_f : $d_f = 273$ mm;

. Parâmetro $nt_f E_f$: $nt_f E_f = 2 \times 0.000167 \times 3900000000 = 130260$ kN/m;

. Parâmetro $L_e = \frac{23.3}{(nt_f E_f)^{0.58}}$: $L_e = \frac{23.3}{(130260)^{0.58}} = 25.16$ mm;

. Parâmetro $k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3}$: $k_1 = \left(\frac{38}{27}\right)^{2/3} = 1.256$;

. Parâmetro $k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f}$: $k_2 = \frac{273 - 25.16}{273} = 0.908$;

. Parâmetro $k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11.9 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75$: $k_v = \frac{1.256 \times 0.908 \times 25.16^{-3}}{11.9 \times 0.008} = 0.301 \leq 0.75$;

. Extensão efectiva no CFRP, $\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu}$: $\varepsilon_{fe} = 0.301 \times 0.008 = 0.00241$,

ou seja, $\varepsilon_{fe} = 0.00241 \leq 0.004$ (valor máximo admissível para a extensão efectiva).

b) *Cálculo da tensão efectiva do CFRP*

A tensão efectiva no CFRP, f_{fe} , foi obtida multiplicando o módulo de elasticidade do compósito, E_f , pela extensão longitudinal efectiva no CFRP, ε_{fe} . Assim, o valor adoptado para a tensão efectiva no CFRP foi de $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 3900000000 \times 0.00241 = 939.9$ MPa.

c) *Cálculo do espaçamento das faixas de manta de CFRP*

Tal como se referiu anteriormente, o espaçamento das faixas de manta de CFRP foi obtido impondo que a contribuição dos CFRP para a resistência ao esforço transversal, V_f , fosse igual a 46.31 kN. Assim:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f}{s_f} = 46.31 \text{ kN},$$

ou seja,

$$s_f = \frac{[4 \times (0.000167) \times 0.025] \times 939900 \times 0.273}{46.31} = 0.093 \text{ m}.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, na viga A12_M foram consideradas para o reforço ao corte faixas com duas camadas de manta de CFRP com 25 mm de largura e espaçadas de 95 mm.

• Vigas da série B

No grupo de vigas da série B que continham 4 ϕ 10 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao esforço transversal com faixas de manta de CFRP (duas camadas) com 25 mm de largura (B10_M). O pré-dimensionamento do reforço desta viga consistiu na determinação do espaçamento das faixas de manta, s_f , de tal forma que a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal da viga B10_M fosse igual à contribuição dos estribos de aço da viga B10_S (estribos verticais de dois ramos com aço de 6 mm de diâmetro espaçados de 150 mm), concretamente, 21.04 kN. Assim, os cálculos efectuados foram os seguintes:

a) *Cálculo da extensão efectiva do CFRP*

- . Determinação da altura útil do reforço, d_f : $d_f = 124 \text{ mm}$;
 - . Parâmetro $nt_f E_f$: $nt_f E_f = 2 \times 0.000167 \times 390000000 = 130260 \text{ kN/m}$;
 - . Parâmetro $L_e = \frac{23.3}{(nt_f E_f)^{0.58}}$: $L_e = \frac{23.3}{(130260)^{0.58}} = 25.16 \text{ mm}$;
 - . Parâmetro $k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3}$: $k_1 = \left(\frac{38}{27}\right)^{2/3} = 1.256$;
 - . Parâmetro $k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f}$: $k_2 = \frac{124 - 25.16}{124} = 0.797$;
 - . Parâmetro $k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11.9 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75$: $k_v = \frac{1.256 \times 0.797 \times 25.16^{-3}}{11.9 \times 0.008} = 0.265 \leq 0.75$;
 - . Extensão efectiva no CFRP, $\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu}$: $\varepsilon_{fe} = 0.265 \times 0.008 = 0.00212$,
- ou seja, $\varepsilon_{fe} = 0.00212 \leq 0.004$ (valor máximo admissível para a extensão efectiva).

b) *Cálculo da tensão efectiva do CFRP*

A tensão efectiva no CFRP, f_{fe} , foi obtida multiplicando o módulo de elasticidade do compósito, E_f , pela extensão longitudinal efectiva no CFRP, ε_{fe} . Assim, o valor adoptado para a tensão efectiva no CFRP foi de $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 3900000000 \times 0.00212 = 826.8 \text{ MPa}$.

c) Cálculo do espaçamento das faixas de manta de CFRP

Tal como se referiu anteriormente, o espaçamento das faixas de manta de CFRP foi obtido impondo que a contribuição dos CFRP para a resistência ao esforço transversal, V_f , fosse igual a 21.04 kN. Assim:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f}{s_f} = 21.04 \text{ kN},$$

ou seja,

$$s_f = \frac{[4 \times (0.000167) \times 0.025] \times 826800 \times 0.124}{21.04} = 0.081 \text{ m}.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, na viga B10_M foram consideradas para o reforço ao corte faixas com duas camadas de manta de CFRP com 25 mm de largura e espaçadas de 80 mm.

No grupo de vigas da série B que continham 4 ϕ 12 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao esforço transversal com faixas de manta de CFRP (duas camadas) com 25 mm de largura (B12_M). O pré-dimensionamento do reforço desta viga consistiu na determinação do espaçamento das faixas de manta, s_f , de tal forma que a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal da viga B12_M fosse igual à contribuição dos estribos de aço da viga B12_S (estribos verticais de dois ramos com aço de 6 mm de diâmetro espaçados de 75 mm), concretamente, 41.73 kN. Assim, os cálculos efectuados foram os seguintes:

a) Cálculo da extensão efectiva do CFRP:

. Determinação da altura útil do reforço, d_f : $d_f = 123 \text{ mm}$;

. Parâmetro $nt_f E_f$: $nt_f E_f = 2 \times 0.000167 \times 3900000000 = 130260 \text{ kN/m}$;

. Parâmetro $L_e = \frac{23.3}{(nt_f E_f)^{0.58}}$: $L_e = \frac{23.3}{(130260)^{0.58}} = 25.16 \text{ mm}$;

. Parâmetro $k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3}$: $k_1 = \left(\frac{38}{27}\right)^{2/3} = 1.256$;

. Parâmetro $k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} : k_2 = \frac{123 - 25.16}{123} = 0.795;$

. Parâmetro $k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11.9 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 : k_v = \frac{1.256 \times 0.795 \times 25.16^{-3}}{11.9 \times 0.008} = 0.264 \leq 0.75;$

. Extensão efectiva no CFRP, $\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} : \varepsilon_{fe} = 0.264 \times 0.008 = 0.00211,$

ou seja, $\varepsilon_{fe} = 0.00211 \leq 0.004$ (valor máximo admissível para a extensão efectiva).

b) Cálculo da tensão efectiva do CFRP.

A tensão efectiva no CFRP, f_{fe} , foi obtida multiplicando o módulo de elasticidade do compósito, E_f , pela extensão longitudinal efectiva no CFRP, ε_{fe} . Assim, o valor adoptado para a tensão efectiva no CFRP foi de $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 390000000 \times 0.00211 = 823.7 \text{ MPa}$.

c) Cálculo do espaçamento das faixas de manta de CFRP

Tal como se referiu anteriormente, o espaçamento das faixas de manta de CFRP foi obtido impondo que a contribuição dos CFRP para a resistência ao esforço transversal, V_f , fosse igual a 41.73 kN. Assim:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f}{s_f} = 41.73 \text{ kN},$$

ou seja,

$$s_f = \frac{[4 \times (0.000167) \times 0.025] \times 823680 \times 0.123}{41.73} = 0.041 \text{ m}.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, na viga B12_M foram consideradas para o reforço ao corte faixas com duas camadas de manta de CFRP com 25 mm de largura e espaçadas de 40 mm.

iv) Quantificação do reforço para as vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento.

Para o reforço ao corte por intermédio da inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento (Figura A.4 - para o caso das vigas da série B com laminados verticais) foram utilizados laminados com secção transversal de 10 mm de largura por 1.4 mm de espessura. O pré-dimensionamento da quantidade de reforço de CFRP determinou o espaçamento dos laminados, s_f , de

tal forma que a contribuição do CFRP para a resistência ao esforço transversal fosse igual à conferida pelos estribos de aço verticais, anteriormente determinada.

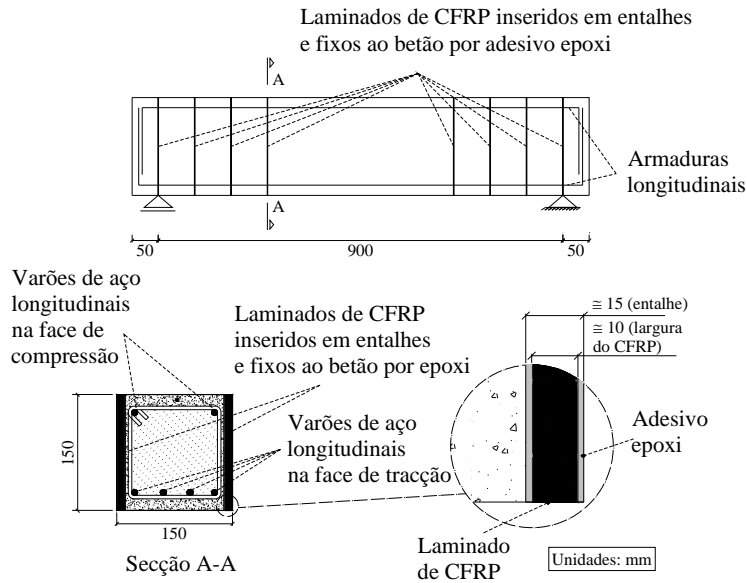


Figura A.4 - Reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais efectuados no betão de recobrimento.

Na altura em que foi realizada esta campanha de ensaios experimentais não havia propostas de dimensionamento, com uma base experimental sólida, para determinar o contributo do reforço ao corte de vigas de betão armado por inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento. Face a esta limitação, no pré-dimensionamento deste tipo de reforço foi utilizada a expressão do REBAP referente à quantificação da resistência ao corte conferida por estribos de aço. Na referida expressão a tensão de cedência da armadura foi substituída pela tensão efectiva do CFRP (f_{fe}), i.e.:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} \times (1 + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f \quad (\text{A.8})$$

em que θ_f é a orientação dos laminados relativamente ao eixo da viga. O valor da tensão efectiva (f_{fe}) resulta do produto do módulo de elasticidade do CFRP (E_f) pela extensão efectiva do CFRP (ε_{fe}). Para a extensão efectiva no CFRP considerou-se, segundo a proposta do ACI (ACI Committee 440, 2002), o valor máximo admissível para o caso do reforço ao corte por intermédio da colagem externa de CFRP ($\varepsilon_{fe} = 0.004$). Assim, a tensão efectiva do CFRP utilizada no pré-dimensionamento do reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas tinha um valor de:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 160000000 \times 0.004 = 640 \text{ MPa}.$$

• Vigas da série A

No grupo de vigas da série A que continham 4 ϕ 10 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao corte com laminados de CFRP verticais (A10_VL) e outra reforçada com laminados de CFRP orientados a 45° (A10_IL). O pré-dimensionamento do reforço destas vigas consistiu no cálculo do espaçamento dos laminados, s_f , de tal forma que a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal fosse igual à contribuição dos estribos de aço da viga A10_S (estribos verticais de dois ramos com aço de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm), concretamente, 23.24 kN.

Para o caso de *laminados verticais* foram efectuados os seguintes cálculos:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} = 23.24 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.274 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{23.24} \times 640000 = 0.190 \text{ m}.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, a viga A10_VL foi reforçada com laminados verticais espaçados de 200 mm.

Para o caso de *laminados a 45°* foram efectuados os seguintes cálculos:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} \times (1 + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f = 23.24 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.274 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{23.24} \times 640000 (1 + \cot g 45) \times \sin 45 = 0.269 \text{ m}.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, a viga A10_IL foi reforçada com laminados inclinados a 45° espaçados de 300 mm.

No grupo de vigas da série A que continham 4 ϕ 12 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais (A12_VL) e outra reforçada com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (A12_IL). O pré-dimensionamento do reforço destas vigas consistiu no cálculo do espaçamento dos laminados, s_f , de tal forma que a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal fosse igual à contribuição dos estribos de aço da viga A12_S (estribos verticais de dois ramos com aço de 6 mm de diâmetro espaçados de 150 mm), concretamente, 46.31 kN.

Para o caso de *laminados verticais* foram efectuados os seguintes cálculos:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} = 46.31 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.273 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{46.31} \times 640000 = 0.095 m.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, a viga A12_VL foi reforçada com laminados verticais espaçados de 100 mm.

Para o caso de *laminados a 45°* foram efectuados os seguintes cálculos:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} \times (1 + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f = 46.31 kN;$$

$$s_f = 0.9 \times 0.273 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{46.31} \times 640000 (1 + \cot g 45) \times \sin 45 = 0.134 m.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, a viga A12_IL foi reforçada com laminados a 45° espaçados de 150 mm.

• Vigas da série B

No grupo de vigas da série B que continham 4φ10 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais (B10_VL) e outra reforçada com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (B10_IL). O pré-dimensionamento do reforço destas vigas consistiu no cálculo do espaçamento dos laminados, s_f , de tal forma que a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal fosse igual à contribuição dos estribos de aço da viga B10-S (estribos verticais de dois ramos com aço de 6 mm de diâmetro espaçados de 150 mm), concretamente, 21.04 kN.

Para o caso de *laminados verticais* foram efectuados os seguintes cálculos:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} = 21.04;$$

$$s_f = 0.9 \times 0.124 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{21.04} \times 640000 = 0.095 m.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, a viga B10_VL foi reforçada com laminados verticais espaçados de 100 mm.

Para o caso de *laminados a 45°* foram efectuados os seguintes cálculos:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} \times (1 + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f = 21.04 kN;$$

$$s_f = 0.9 \times 0.124 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{21.04} \times 640000 (1 + \cot g 45) \times \sin 45 = 0.134 m.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, a viga B10_IL foi reforçada com laminados a 45° espaçados de 150 mm.

No grupo de vigas da série B que continham 4φ12 longitudinais considerou-se uma viga reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais (B12_VL) e outra reforçada com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (B12_IL). O pré-dimensionamento do reforço destas vigas consistiu no cálculo do espaçamento dos laminados, s_f , de tal forma que a contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal fosse igual à contribuição dos estribos de aço da viga B12_S (estribos verticais de dois ramos com aço de 6 mm de diâmetro espaçados de 75 mm), concretamente, 41.73 kN.

Para o caso de *laminados verticais* foram efectuados os seguintes cálculos:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} = 41.73 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.123 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{41.73} \times 640000 = 0.048 \text{ m}.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, a viga B12_VL foi reforçada com laminados verticais espaçados de 50 mm.

Para o caso de *laminados a 45°* foram efectuados os seguintes cálculos:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} \times (1 + \cot \theta_f) \times \sin \theta_f = 41.73 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.123 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{41.73} \times 640000 (1 + \cot 45) \times \sin 45 = 0.067 \text{ m}.$$

Como resultado do pré-dimensionamento efectuado, a viga B12_IL foi reforçada com laminados a 45° espaçados de 75 mm.

v) Resultados do pré-dimensionamento

As soluções obtidas com o pré-dimensionamento dos reforços ao corte de vigas de betão armado estão compiladas na Tabela 3.1 e ilustradas na Figura 3.4 do Capítulo 3.

2. Série de vigas T (Capítulo 4)

O programa experimental apresentado no Capítulo 4 foi constituído por quatro séries de vigas T de betão armado (A, B, C e D). Nesta secção será relatado o processo que conduziu aos modelos de

vigas de betão armado e será descrita a forma como foram obtidas todas as soluções de reforços de CFRP ensaiadas no referido programa experimental.

No pré-dimensionamento das séries de vigas T foram tidos em consideração os resultados obtidos no programa experimental apresentado no Capítulo 3 e os desenvolvimentos que ocorreram na investigação sobre a técnica NSM com laminados de CFRP, no período de tempo compreendido entre a realização do mencionado programa experimental (Capítulo 3) e a concepção das séries de vigas T (Capítulo 4). Desta forma, foi possível introduzir, no critério de pré-dimensionamento dos reforços de CFRP usando a técnica NSM, informação relevante directamente associada à referida técnica de reforço. Em face do que se acaba de relatar houve necessidade de efectuar alguns ajustes em relação ao pré-dimensionamento apresentado na secção 1 deste anexo.

A primeira alteração relacionou-se com a imposição do modo de rotura por corte, nomeadamente, na relação entre a carga de rotura por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$) e a carga de rotura por corte (F_{rotura}^{corte}). Na Tabela A.4 foram apresentados os valores da referida relação para as quatro séries de vigas testadas no programa experimental do Capítulo 3 (valores que variaram entre 1.05 e 1.50). O que se veio a constatar com a realização dos referidos ensaios foi que, em algumas vigas, o modo de rotura acabou por ser por flexão. Desta forma, e para evitar que tal voltasse a ocorrer para as vigas T, já que era um requisito pré-estabelecido que as vigas atingissem rotura por corte (ver secção 4.1), foi necessário aumentar os valores da referida relação ($F_{rotura}^{flexão} / F_{rotura}^{corte}$).

A segunda alteração relacionou-se com o valor da extensão no CFRP (ε_{fe}) e, consequentemente, do valor da tensão no CFRP (f_{fe}) a utilizar no pré-dimensionamento das soluções de reforço referentes à técnica NSM (expressão A.8). O valor de ε_{fe} adoptado para as vigas T foi de 5‰, e não de 4‰ como foi utilizado nas vigas do Capítulo 3. A consideração de $\varepsilon_{fe} = 5‰$ resultou de um compromisso entre o valor máximo recomendado pelo ACI Committe 440 (2002) para a técnica da colagem externa (4‰) e o valor de 5.9‰ obtido em ensaios de arranque em flexão usando laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM (Sena-Cruz e Barros, 2004).

2.1. Série A

Na Tabela A.5 apresentam-se os valores das características dos materiais considerados no pré-dimensionamento das vigas da série A.

Tabela A.5 - Características dos materiais da série A (valores de pré-dimensionamento).

Betão	Resistência à compressão: 35 MPa		
Aço	Tensão nas armaduras longitudinais ($\phi 16$ e $\phi 25$): 500 MPa		
	Tensão nas armaduras transversais ($\phi 6$): 600 MPa		
Laminado de CFRP	Módulo de elasticidade: 160 GPa	Largura: 10 mm	Espessura: 1.4 mm

i) Quantificação da carga de rotura das vigas: modo de rotura por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$)

Na Figura A.5 apresenta-se o modelo estrutural das vigas da série A e que foi o mesmo das vigas das séries B e C. O momento resistente da secção de betão armado das vigas da série A ($M_{res.}$) foi determinado recorrendo às equações que impõe o seu equilíbrio interno (ver Figura A.6), ou seja, o somatório de forças e o somatório de momentos, ao nível de uma determinada fibra da secção, tinham que ser igual a zero. Assim, os cálculos efectuados para se obter o valor da carga de rotura por flexão das vigas da série A foram:

a) Cálculo do valor das forças F_C , $F_S^{2\phi 16}$ e $F_S^{3\phi 25}$ (ver Figura A.6)

$$F_C = 0.85 \times 35000 \times 0.8 \times x \times 0.45 = 10710x$$

$$F_S^{2\phi 16} = 4.02 \times 10^{-4} \times 500000 = 201.0 \text{ kN}$$

$$F_S^{3\phi 25} = 14.73 \times 10^{-4} \times 500000 = 736.5 \text{ kN}$$

b) Determinação da posição do eixo neutro (imposição do equilíbrio de forças - ver Figura A.6)

$$F_C = F_S^{2\phi 16} + F_S^{3\phi 25} \Leftrightarrow 10710x = 201.0 + 736.5 \Leftrightarrow x = 0.087535 \text{ m (eixo neutro no banzo)}$$

c) Determinação do momento resistente da secção, $M_{res.}$ (imposição do equilíbrio de momentos ao nível da fibra da secção referente à posição da resultante de força F_C - ver Figura A.6)

$$M_{res.} = 736.5 \times (0.365 - 0.4 \times 0.087535) + 201.0 \times (0.325 - 0.4 \times 0.087535) \Leftrightarrow M_{res.} = 301.3 \text{ kN.m.}$$

d) Determinação da carga de rotura das vigas por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$)

Obtido o valor do momento resistente da secção ($M_{res.}$), a carga de rotura previsível, por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$), das vigas ensaiadas referente à série A foi determinada por (ver Figura A.5):

$$M_{res.} = 0.54 \times F_{rotura}^{flexão} \Rightarrow F_{rotura}^{flexão} = 301.3 / 0.54 = 558.0 \text{ kN.}$$

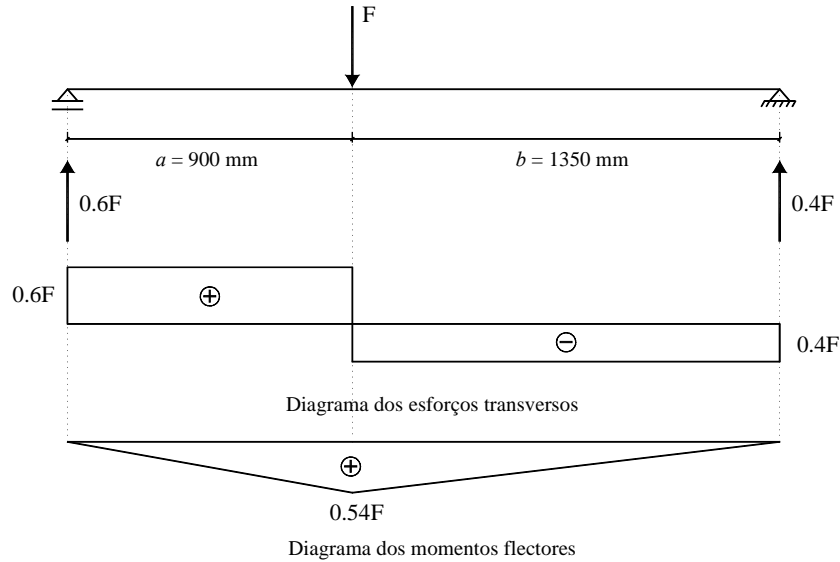


Figura A.5 - Modelo estrutural das vigas ensaiadas e diagramas de esforços transversos e momentos flectores.

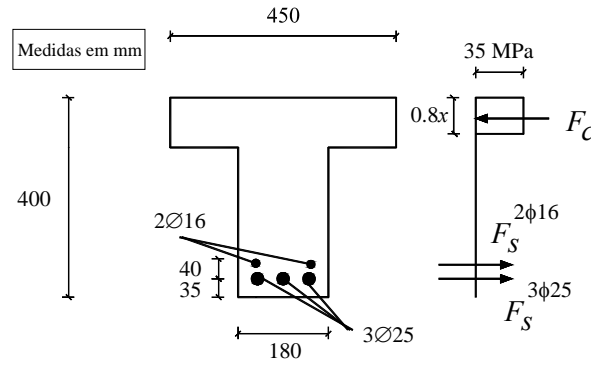


Figura A.6 - Dados para o cálculo do momento resistente da secção das vigas da série A.

ii) Quantificação da carga de rotura da viga 6S-R-A

O modelo que serviu de base ao pré-dimensionamento dos reforços de CFRP das vigas da série A foi a viga 6S-R-A, que está representada na Figura A.7, e que se caracterizava por conter no vão de corte a estribos verticais (dois ramos) de aço de 6 mm de diâmetro afastados de 130 mm ($\phi 6@130\text{mm}$). Na presente série, esta viga foi uma das que foram concebidas para alcançarem o valor máximo de carga de rotura.

A contribuição do betão para a resistência ao esforço transversal da viga 6S-R-A foi obtida por intermédio da expressão (A.4):

$$V_c = \tau_l \times b_w \times d_s = 850 \times 0.18 \times 0.356 = 54.5 \text{ kN} .$$

A contribuição dos estribos de aço, colocados verticalmente no menor vão de corte a da viga 6S-R-A, na resistência ao esforço transversal foi obtida por intermédio da expressão (A.5):

$$V_s = 0.9 \times d_s \times \frac{A_{sw}}{s} \times f_{sy} = 0.9 \times 0.356 \times \frac{2 \times 0.28 \times 10^{-4}}{0.13} \times 600000 = 82.8 \text{ kN} .$$

O valor do esforço transversal resistente da viga 6S-R-A, no menor vão de corte, foi determinado usando a expressão (A.6):

$$V_{res.} = V_c + V_s = 54.5 + 82.8 = 137.3 \text{ kN}.$$

Atendendo ao modelo estrutural representado na Figura A.5, a carga previsível de rotura por corte (F_{rotura}^{corte}) da viga 6S-R-A foi obtida por intermédio da seguinte expressão:

$$V_{res.} = 0.6 F_{rotura}^{corte} \Rightarrow F_{rotura}^{corte} = 228.8 \text{ kN}.$$

Assim, tendo em conta os valores previsíveis da carga de rotura da viga 6S-R-A em termos de corte e de flexão, respectivamente, $F_{rotura}^{corte} = 228.8 \text{ kN}$ e $F_{rotura}^{flexão} = 558.0 \text{ kN}$, foi assegurada a rotura da viga por corte ($F_{rotura}^{flexão} / F_{rotura}^{corte} = 2.44$).

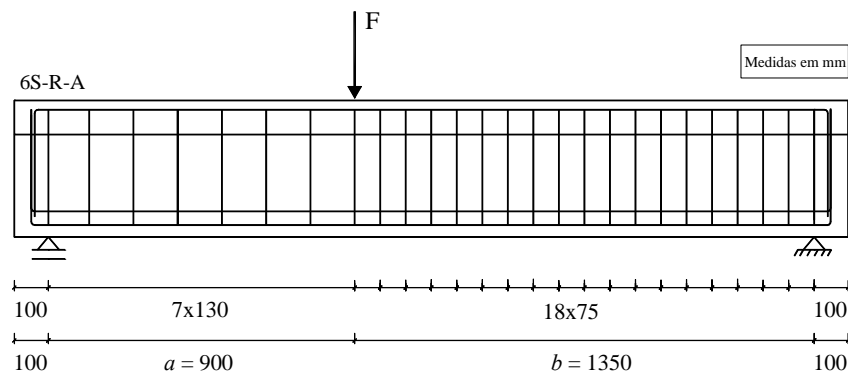


Figura A.7 - Viga 6S-R-A.

iii) Quantificação do reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento

A série de vigas A foi realizada com o objectivo de avaliar a influência da percentagem e orientação de laminados de CFRP quando aplicados, segundo a técnica NSM, no reforço ao corte de vigas de betão armado de secção em T contendo uma determinada percentagem de armadura transversal. Foram analisadas três orientações para os laminados (verticais, inclinados a 45° ou inclinados a 60°) e, para cada uma destas orientações, foram consideradas três percentagens de CFRP. O modelo de betão armado que foi reforçado com as várias soluções de CFRP, anteriormente referidas, continha no vão de corte a , conforme representado na Figura A.8, estribos verticais (dois ramos) de aço de 6 mm de diâmetro afastados de 300 mm ($\phi 6@300\text{mm}$). Para os modelos reforçados com a maior percentagem de CFRP, independentemente do tipo de orientação dos laminados, as soluções de reforço foram obtidas impondo que as referidas vigas tivessem uma capacidade máxima de carga semelhante à da viga de betão armado 6S-R-A.

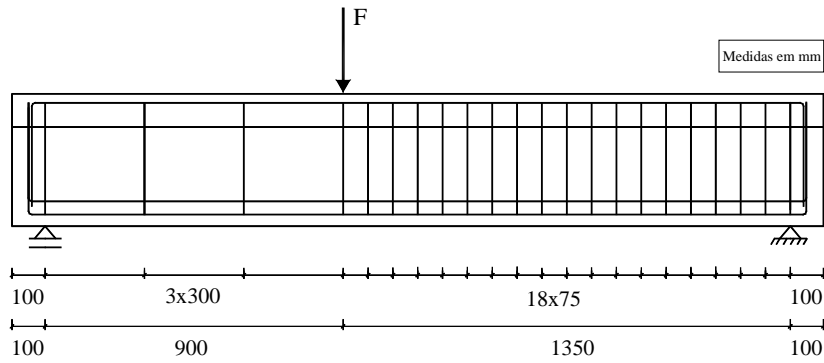


Figura A.8 - Modelo de betão armado da série A que foi reforçado com CFRP.

A contribuição dos estribos de aço, colocados verticalmente no menor vão de corte, para a resistência ao esforço transversal da viga representada na Figura A.8 foi obtida por intermédio da expressão (A.5):

$$V_s = 0.9 \times d_s \times \frac{A_{sw}}{s} \times f_{sy} = 0.9 \times 0.356 \times \frac{2 \times 0.28 \times 10^{-4}}{0.3} \times 600000 = 35.9 \text{ kN}.$$

A diferença entre o valor de V_s da viga 6S-R-A ($\phi 6@130\text{mm}$) e o valor de V_s da viga onde foi aplicado o reforço de CFRP ($\phi 6@300\text{mm}$) era de 46.9 kN. Assim, o pré-dimensionamento do reforço de CFRP dos modelos com a maior percentagem de laminados, independentemente da sua orientação, foi efectuado por forma a que a contribuição do CFRP para a resistência ao esforço transversal fosse cerca dos 50 kN ($V_f = 50 \text{ kN}$). Para tal, foi utilizada a expressão (A.8) em que para o cálculo do valor da tensão efectiva (f_{fe}) foi considerado, tal como se referiu no início desta secção, uma extensão efectiva no CFRP de $\varepsilon_{fe} = 0.005$, ou seja:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 160000000 \times 0.005 = 800 \text{ MPa}.$$

• Solução de laminados verticais

A aplicação da expressão (A.8) para a solução de laminados verticais, atendendo a que $V_f = 50 \text{ kN}$, resultou em:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} = 50 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.256 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{50} \times 800000 = 0.103 \text{ m}.$$

Face ao critério escolhido para a distribuição dos CFRP, descrito na secção 4.2.1 do capítulo 4 (Figura 4.3), a solução de reforço adoptada foi **oito laminados em cada face do vão de corte a espaçados de 10 cm**.

• Solução de laminados inclinados a 45°

A aplicação da expressão (A.8) para a solução de laminados inclinados a 45°, atendendo a que $V_f = 50 \text{ kN}$, resultou em:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} \times (1 + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f = 50 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.256 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (10/1000)}{50} \times 800000 \times (1 + \cot g 45) \times \sin 45 = 0.146 \text{ m}.$$

Face ao critério escolhido para a distribuição dos CFRP, descrito na secção 4.2.1 do capítulo 4 (Figura 4.3), a solução de reforço adoptada foi ***oito laminados em cada face do vão de corte a espaçados de 13.8 cm.***

• Solução de laminados inclinados a 60°

A aplicação da expressão (A.8) para a solução de laminados inclinados a 60°, atendendo a que $V_f = 50 \text{ kN}$, resultou em:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} \times (1 + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f = 50 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.256 \times \frac{(1.4/1000) \times (10/1000) \times 2}{50} \times 800000 \times (1 + \cot g 60) \times \sin 60 = 0.141 \text{ m}.$$

Face ao critério escolhido para a distribuição dos CFRP, descrito na secção 4.2.1 do capítulo 4 (Figura 4.3), a solução de reforço adoptada foi ***sete laminados em cada face do vão de corte a espaçados de 13.9 cm.***

As soluções de reforço referentes às duas percentagens mais baixas de CFRP foram obtidas considerando o resultado do pré-dimensionamento das vigas com a maior percentagem de CFRP, por intermédio de uma diminuição gradual do número de laminados. Para as três orientações de CFRP analisadas (90°, 45° e 60°), as soluções de reforço referentes à percentagem mínima e intermédia de CFRP, por face da alma da viga do vão de corte *a*, foram as seguintes: três laminados para a percentagem mínima e cinco laminados para a percentagem intermédia. Quer para a percentagem mínima como para a percentagem intermédia de CFRP, o espaçamento dos laminados, para cada uma das orientações testadas, foi obtido de forma a que as respectivas vigas tivessem uma capacidade máxima resistente semelhante. Na Tabela A.6 apresentam-se, de uma forma resumida, a quantidade e o espaçamento dos laminados para as nove vigas da série A que foram reforçadas ao corte com

CFRP usando a técnica NSM. Na mesma tabela também se apresenta, para as referidas vigas, os valores de pré-dimensionamento da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal. A pormenorização das soluções de reforço obtidas estão representadas na Figura 4.4 e na Tabela 4.2 do Capítulo 4.

Tabela A.6 - Laminados de CFRP inseridos em cada face do vão de corte a (vigas da série A).

Orientação dos laminados	Menor percentagem de CFRP	Percentagem intermédia de CFRP	Máxima percentagem de CFRP
Verticais	3 laminados espaçados de 267 mm ($V_f = 19.3 \text{ kN}$)	5 laminados espaçados de 160 mm ($V_f = 32.3 \text{ kN}$)	8 laminados espaçados de 100 mm ($V_f = 51.6 \text{ kN}$)
Inclinados a 45°	3 laminados espaçados de 367 mm ($V_f = 19.9 \text{ kN}$)	5 laminados espaçados de 220 mm ($V_f = 33.2 \text{ kN}$)	8 laminados espaçados de 138 mm ($V_f = 52.9 \text{ kN}$)
Inclinados a 60°	3 laminados espaçados de 325 mm ($V_f = 21.7 \text{ kN}$)	5 laminados espaçados de 195 mm ($V_f = 36.2 \text{ kN}$)	7 laminados espaçados de 139 mm ($V_f = 50.7 \text{ kN}$)

(valor) - Contribuição do CFRP estimada para a resistência ao esforço transversal considerando a expressão (A.8).

2.2 Série B

Um dos objectivos que tiveram na base da concepção das vigas da série B foi alargar a gama das percentagens de CFRP já testadas na série A. Desta forma, foram avaliadas três novas percentagens de reforço e, para cada uma delas, foram analisadas as mesmas três orientações dos laminados adoptadas na série A. A escolha das novas percentagens de CFRP foi condicionada por dois factos que se registaram nos ensaios das vigas T da série anterior. O primeiro foi o baixo rendimento verificado em termos de acréscimo da capacidade de carga máxima de duas soluções de reforço referentes à menor percentagem de CFRP testada. Assim sendo, na série B foi aumentado o valor da menor percentagem de CFRP utilizada na série A. O segundo facto relacionou-se com o modo de rotura observado nas vigas com a maior percentagem de CFRP e que indicava que existiria um limite mínimo para o espaçamento dos laminados, a partir do qual não haverá mais contributo no aumento da capacidade de carga da viga reforçada. Para uma melhor exploração deste fenómeno, a gama de valores da maior percentagem de CFRP nas vigas da série B foi maior que a adoptada na série A. Como consequência, a viga de betão armado de referência, a partir da qual se definiu a maior percentagem de reforço de CFRP na série B (7S-R-B), tinha que ter uma capacidade de carga máxima superior à viga considerada, para o mesmo efeito, na série A (6S-R-A com $\rho_{sw} = 0.24\%$). Desta forma, para a viga 7S-R-B foi adoptada uma percentagem de armadura transversal de $\rho_{sw} = 0.28\%$. As novas três percentagens de reforço de CFRP foram aplicadas a vigas semelhantes às da série A, ou

seja, a vigas com uma percentagem de armadura transversal no vão de corte a de $\rho_{sw} = 0.10\%$ ($\phi 6@300\text{mm}$).

Em qualquer intervenção de reforço ao corte de vigas de betão armado estas apresentam uma determinada percentagem de armadura resistente ao esforço transversal que, normalmente, é conferida por intermédio de estribos de aço verticais. A outra intenção associada à série de vigas B foi, precisamente, avaliar o efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica de reforço ao corte em análise. Para tal, algumas das soluções de reforço aplicadas nas vigas com $\rho_{sw}=0.10\%$ foram, também, aplicadas em vigas com $\rho_{sw}=0.17\%$ ($\phi 6@180\text{mm}$).

Para cada uma das percentagens de laminados de CFRP, quer para as vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$ quer para as vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$, foi concebida uma viga reforçada ao corte com faixas discretas, em forma de U, de mantas unidireccionais de CFRP coladas externamente.

Na Tabela A.7 apresentam-se os valores das características dos materiais considerados no pré-dimensionamento das vigas da série B.

Tabela A.7 - Características dos materiais da série B (valores de pré-dimensionamento).

Betão	Resistência à compressão: 35 MPa		
Aço	Tensão nas armaduras longitudinais ($\phi 16$ e $\phi 25$): 500 MPa		
	Tensão nas armaduras transversais ($\phi 6$): 600 MPa		
Laminado de CFRP	Módulo de elasticidade: 160 GPa	Largura: 9.5 mm	Espessura: 1.4 mm
Mantas de CFRP	Módulo de elasticidade: 240 GPa	Extensão última: 1.5%	Largura: 60 mm Espessura: 0.176 mm

i) Quantificação da carga de rotura das vigas: modo de rotura por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$)

Tal como já foi referido anteriormente, o modelo estrutural das vigas da série B era igual ao das vigas da série A (Figura A.5). O momento resistente da secção de betão armado das vigas da série B ($M_{res.}$) foi determinado recorrendo às equações que impõe o seu equilíbrio interno (ver Figura A.9), ou seja, o somatório de forças e o somatório de momentos, ao nível de uma determinada fibra da secção, tinham que ser igual a zero. Assim, os cálculos efectuados para se obter o valor da carga de rotura por flexão das vigas da série B foram:

a) Cálculo do valor das forças F_C , $F_S^{1\phi 16}$ e $F_S^{2\phi 32}$ (ver Figura A.9)

$$F_C = 0.85 \times 35000 \times 0.8 \times x \times 0.45 = 10710x$$

$$F_S^{1\phi 16} = 2.01 \times 10^{-4} \times 500000 = 100.5 \text{ kN}$$

$$F_S^{2\phi 32} = 16.08 \times 10^{-4} \times 500000 = 804.0 \text{ kN}$$

b) Determinação da posição do eixo neutro (imposição do equilíbrio de forças - ver Figura A.9)

$$F_C = F_S^{1\phi 16} + F_S^{2\phi 32} \Leftrightarrow 10710x = 100.5 + 804.0 \Leftrightarrow x = 0.084454 \text{ m (eixo neutro no banzo)}$$

c) Determinação do momento resistente da secção, $M_{res.}$ (imposição do equilíbrio de momentos ao nível da fibra da secção referente à posição da resultante de força F_C - ver Figura A.9)

$$M_{res.} = 904.5 \times (0.359 - 0.4 \times 0.084454) \Leftrightarrow M_{res.} = 294.2 \text{ kN.m.}$$

d) Determinação da carga de rotura das vigas por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$)

Obtido o valor do momento resistente da secção ($M_{res.}$), a carga de rotura previsível, por flexão ($F_{rotura}^{flexão}$), das vigas ensaiadas referentes à série B foi determinada por (ver Figura A.5):

$$M_{res.} = 0.54 \times F_{rotura}^{flexão} \Rightarrow F_{rotura}^{flexão} = 294.2 / 0.54 = 544.8 \text{ kN.}$$

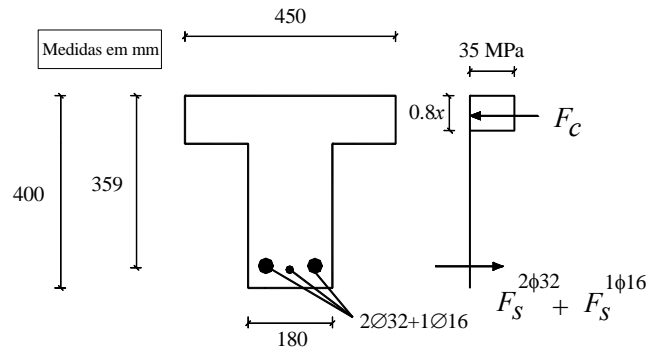


Figura A.9 - Dados para o cálculo do momento resistente da secção das vigas da série B.

ii) Quantificação da carga de rotura da viga 7S-R-B

O modelo que serviu de base ao pré-dimensionamento dos reforços de CFRP das vigas da série B foi a viga 7S-R-B, que está representada na Figura A.10, e que se caracterizava por conter no vão de corte a estribos verticais (dois ramos) de aço de 6 mm de diâmetro afastados de 112.5 mm ($\phi 6@112.5\text{mm}$). Na presente série, esta viga foi uma das que foram concebidas para alcançarem o valor máximo de carga de rotura.

A contribuição do betão para a resistência ao esforço transversal da viga 7S-R-B foi obtida por intermédio da expressão (A.4):

$$V_c = \tau_1 \times b_w \times d_s = 850 \times 0.18 \times 0.359 = 54.9 \text{ kN}.$$

A contribuição dos estribos de aço, colocados verticalmente no menor vão de corte a da viga 7S-R-B, na resistência ao esforço transversal foi obtida por intermédio da expressão (A.5):

$$V_s = 0.9 \times d_s \times \frac{A_{sw}}{s} \times f_{sy} = 0.9 \times 0.359 \times \frac{2 \times 0.28 \times 10^{-4}}{0.1125} \times 600000 = 96.5 \text{ kN}.$$

O valor do esforço transversal resistente da viga 7S-R-B, no menor vão de corte, foi determinado usando a expressão (A.6):

$$V_{res} = V_c + V_s = 54.9 + 96.5 = 151.4 \text{ kN}.$$

Atendendo ao modelo estrutural representado na Figura A.5, a carga previsível de rotura por corte (F_{rotura}^{corte}) da viga 7S-R-B foi obtida por intermédio da seguinte expressão:

$$V_{res} = 0.6 F_{rotura}^{corte} \Rightarrow F_{rotura}^{corte} = 252.3 \text{ kN}.$$

Assim, tendo em conta os valores previsíveis da carga de rotura da viga 7S-R-B em termos de corte e de flexão, respectivamente, $F_{rotura}^{corte} = 252.3 kN$ e $F_{rotura}^{flexão} = 544.8 kN$, foi assegurada a rotura da viga por corte ($F_{rotura}^{flexão} / F_{rotura}^{corte} = 2.16$).

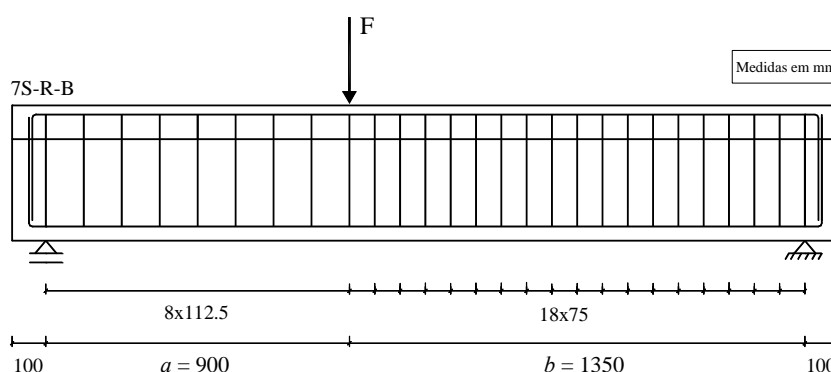


Figura A.10 - Viga 7S-R-B.

iii) Quantificação do reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento
(vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$)

O modelo de betão armado reforçado ao corte com CFRP contendo uma percentagem de armadura $\rho_{sw} = 0.10\%$ (Figura A.11) continha no vão de corte a , à semelhança dos modelos da série A, estribos verticais (dois ramos) de aço de 6 mm de diâmetro afastados de 300 mm ($\phi 6@300\text{mm}$).

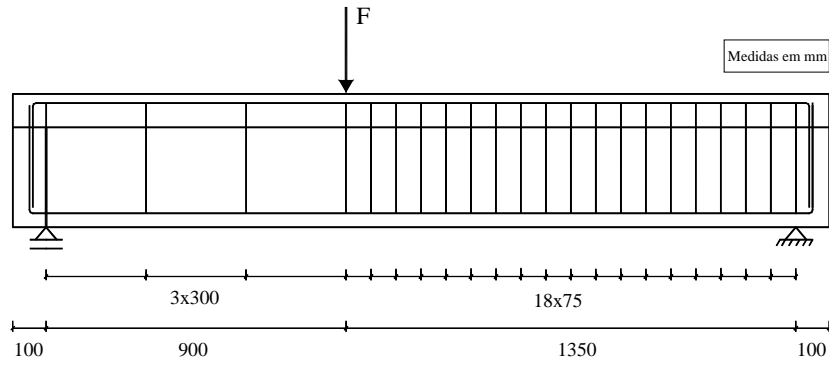


Figura A.11 - Modelo de betão armado que foi reforçado com CFRP ($\rho_{sw} = 0.10\%$).

A contribuição dos estribos de aço, colocados verticalmente no menor vão de corte, para a resistência ao esforço transversal da viga representada na Figura A.11 foi obtida por intermédio da expressão (A.5):

$$V_s = 0.9 \times d_s \times \frac{A_{sw}}{s} \times f_{sy} = 0.9 \times 0.359 \times \frac{2 \times 0.28 \times 10^{-4}}{0.3} \times 600000 = 36.2 \text{ kN}.$$

A diferença entre o valor de V_s da viga 7S-R-B ($\phi 6 @ 112.5 \text{ mm}$) e o valor de V_s da viga onde foi aplicado o reforço de CFRP ($\phi 6 @ 300 \text{ mm}$) era de 60.3 kN. Assim, o pré-dimensionamento do reforço de CFRP dos modelos com a maior percentagem de laminados, independentemente da sua orientação, foi efectuado por forma a que a contribuição do CFRP para a resistência ao esforço transversal fosse da ordem de grandeza anteriormente referida ($V_f = 60 \text{ kN}$). Para tal, foi utilizada a expressão (A.8) em que para o cálculo do valor da tensão efectiva (f_{fe}) foi considerado $\varepsilon_{fe} = 0.005$, ou seja:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 160000000 \times 0.005 = 800 \text{ MPa}.$$

• Solução de laminados verticais

A aplicação da expressão (A.8) para a solução de laminados verticais, atendendo a que $V_f = 60 \text{ kN}$, resultou em:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} = 60 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.259 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (9.5/1000)}{60} \times 800000 = 0.083 \text{ m}.$$

Face ao critério escolhido para a distribuição dos CFRP, descrito na secção 4.2.1 do capítulo 4 (Figura 4.3), a solução de reforço adoptada foi **dez laminados em cada face do vão de corte a espaçados de 8 cm**.

• Solução de laminados inclinados a 45°

A aplicação da expressão (A.8) para a solução de laminados inclinados a 45°, atendendo a que $V_f = 60 \text{ kN}$, resultou em:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} \times (1 + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f = 60 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.259 \times \frac{2 \times (1.4/1000) \times (9.5/1000)}{60} \times 800000 \times (1 + \cot g 45) \times \sin 45 = 0.117 \text{ m}.$$

Face ao critério escolhido para a distribuição dos CFRP, descrito na secção 4.2.1 do capítulo 4 (Figura 4.3), a solução de reforço adoptada foi **dez laminados em cada face do vão de corte a espaçados de 11.0 cm.**

• Solução de laminados inclinados a 60°

A aplicação da expressão (A.8) para a solução de laminados inclinados a 60°, atendendo a que $V_f = 60 \text{ kN}$, resultou em:

$$V_f = 0.9 \times d_f \times \frac{A_{fv}}{s_f} \times f_{fe} \times (1 + \cot g \theta_f) \times \sin \theta_f = 60 \text{ kN};$$

$$s_f = 0.9 \times 0.259 \times \frac{(1.4/1000) \times (9.5/1000) \times 2}{60} \times 800000 \times (1 + \cot g 60) \times \sin 60 = 0.113 \text{ m}.$$

Face ao critério escolhido para a distribuição dos CFRP, descrito na secção 4.2.1 do capítulo 4 (Figura 4.3), a solução de reforço adoptada foi **nove laminados em cada face do vão de corte a espaçados de 10.8 cm.**

As soluções de reforço referentes às duas percentagens mais baixas de CFRP foram obtidas considerando o resultado do pré-dimensionamento das vigas com a maior percentagem de CFRP por intermédio de uma diminuição gradual do número de laminados. Para as três orientações de CFRP analisadas (90°, 45° e 60°), a solução de reforço referente à percentagem mínima foi a adopção de quatro laminados em cada face do vão de corte *a*. Para a percentagem intermédia foram aplicados por face do menor vão de corte *a* sete laminados verticais, sete laminados inclinados a 45° e seis laminados inclinados a 60°. Quer para a percentagem mínima como para a percentagem intermédia de CFRP, o espaçamento dos laminados, para cada uma das orientações testadas, foi obtido de forma a que as respectivas vigas tivessem uma capacidade máxima resistente semelhante. Na Tabela A.8 apresentam-se, de uma forma resumida, a quantidade e o espaçamento dos laminados para as nove

soluções de reforço de CFRP usando a técnica NSM que foram testadas na série B. Na mesma tabela também se apresenta, para as referidas soluções, os valores de pré-dimensionamento da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal.

Tabela A.8 - Laminados de CFRP inseridos em cada face do vão de corte a (vigas da série B).

Orientação dos laminados	Menor percentagem de CFRP	Percentagem intermédia de CFRP	Máxima percentagem de CFRP
Verticais	4 laminados espaçados de 180mm ($V_f = 27.6 \text{ kN}$)	7 laminados espaçados de 114mm ($V_f = 43.5 \text{ kN}$)	10 laminados espaçados de 80mm ($V_f = 62.0 \text{ kN}$)
Inclinados a 45°	4 laminados espaçados de 275mm ($V_f = 25.5 \text{ kN}$)	7 laminados espaçados de 157mm ($V_f = 44.7 \text{ kN}$)	10 laminados espaçados de 110mm ($V_f = 63.8 \text{ kN}$)
Inclinados a 60°	4 laminados espaçados de 243mm ($V_f = 27.9 \text{ kN}$)	6 laminados espaçados de 162mm ($V_f = 41.8 \text{ kN}$)	9 laminados espaçados de 108mm ($V_f = 62.7 \text{ kN}$)

(valor) - Contribuição do CFRP estimada para a resistência ao esforço transversal considerando a expressão (A.8).

iv) Quantificação do reforço ao corte com mantas de CFRP coladas externamente (vigas com $\rho_{sw} = 0.10\%$)

O reforço ao corte aplicado com a técnica da colagem externa (EBR) foi materializado por intermédio de faixas discretas de manta de CFRP unidireccional, em forma de U, com uma largura de 60 mm. Para cada percentagem de laminados testada na presente série de vigas T (Tabela A.7) foi executada uma viga reforçada com a técnica EBR. O critério de pré-dimensionamento de cada viga EBR foi impor que a sua capacidade máxima de carga fosse, em termos médios, semelhante à esperada nas respectivas vigas NSM. Seguindo a proposta do *ACI* (ACI Committee 440, 2002) para a contabilização da resistência ao esforço transversal dos compósitos de CFRP colados externamente apresentam-se, de seguida, os passos que conduziram à obtenção da quantidade de reforço de manta de CFRP em cada uma das três soluções de reforço testadas.

• Solução referente à menor percentagem de CFRP

a) *Cálculo da extensão efectiva do CFRP*

. Determinação da altura útil do reforço, d_f : $d_f = 259 \text{ mm}$;

. Parâmetro $nt_f E_f$: $nt_f E_f = 1 \times 0.000176 \times 240000000 = 42240 \text{ kN/m}$;

. Parâmetro $L_e = \frac{23.3}{(nt_f E_f)^{0.58}}$: $L_e = \frac{23.3}{(42240)^{0.58}} = 48.35 \text{ mm}$;

. Parâmetro $k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3} : k_1 = \left(\frac{35}{27}\right)^{2/3} = 1.1889;$

. Parâmetro $k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} : k_2 = \frac{259 - 48.35}{259} = 0.8133;$

. Parâmetro $k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11.9 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 : k_v = \frac{1.1889 \times 0.8133 \times 48.35 \times 10^{-3}}{11.9 \times 0.0155} = 0.2535 \leq 0.75 ;$

. Extensão efectiva no CFRP ($\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu}$): $\varepsilon_{fe} = 0.2535 \times 0.015 = 0.0038$, ou seja,
 $\varepsilon_{fe} = 0.00393 \leq 0.004$ (valor máximo admissível para a extensão efectiva).

b) Cálculo da tensão efectiva do CFRP

A tensão efectiva no CFRP, f_{fe} , é obtida multiplicando o módulo de elasticidade do compósito, E_f , pela extensão longitudinal efectiva no CFRP, ε_{fe} . Assim, o valor adoptado para a tensão efectiva no CFRP foi de $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 240000000 \times 0.0038 = 912.0 \text{ MPa}$.

c) Definição da solução de reforço

A solução de reforço com mantas de CFRP foi obtida impondo que a sua contribuição para a resistência ao esforço transversal, V_f , fosse semelhante à média dos valores de V_f referentes às três soluções de laminados com a menor percentagem de CFRP (Tabela A.7), ou seja, $V_f \cong 27.0 \text{ kN}$. Assim:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f}{s_f} = 27.0 \text{ kN};$$

$$V_f = \frac{2 \times (0.000176) \times 0.06 \times 912000 \times 0.259}{27.0} = 0.185 \text{ m}$$

Face ao critério escolhido para a distribuição dos CFRP, descrito na secção 4.2.1 do capítulo 4 (Figura 4.3), a solução de reforço adoptada foi ***quatro faixas com uma camada de manta em forma de U com 6 cm de largura e um espaçamento de 18.0 cm (o mesmo que a solução de laminados verticais para a menor percentagem de CFRP - ver Tabela A.8).***

• Solução referente à percentagem intermédia de CFRP

a) Cálculo da extensão e da tensão efectiva do CFRP

De acordo com o que foi calculado na solução de reforço anterior, a extensão efectiva e a tensão efectiva no CFRP valem $\varepsilon_{fe} = 0.0038$ e $f_{fe} = 912.0 \text{ MPa}$, respectivamente.

b) *Definição da solução de reforço*

A solução de reforço com mantas de CFRP foi obtida impondo que a sua contribuição para a resistência ao esforço transversal, V_f , fosse semelhante à média dos valores de V_f referentes às três soluções de laminados com a percentagem intermédia de CFRP (Tabela A.7), ou seja, $V_f \cong 43.3$ kN.

Assim:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f}{s_f} = 43.3 \text{ kN};$$

$$s_f = \frac{2 \times (0.000176) \times 0.06 \times 912000 \times 0.259}{43.3} = 0.115 \text{ m}$$

Face ao critério escolhido para a distribuição dos CFRP, descrito na secção 4.2.1 do capítulo 4 (Figura 4.3), a solução de reforço adoptada foi **sete faixas com uma camada de manta em forma de U com 6 cm de largura e um espaçamento de 11.4 cm (o mesmo que a solução de laminados verticais para a percentagem intermédia de CFRP - ver Tabela A.8).**

• Solução referente à maior percentagem de CFRP

Para a solução de reforço com mantas de CFRP o recurso a uma camada de manta conduziria a uma solução contínua do reforço e não uma solução discreta como inicialmente foi estabelecido. Assim, para a maior percentagem de CFRP foram adoptadas faixas com duas camadas de manta.

d) *Cálculo da extensão efectiva do CFRP:*

. Determinação da altura útil do reforço, d_f : $d_f = 259$ mm;

. Parâmetro $nt_f E_f$: $nt_f E_f = 2 \times 0.000176 \times 240000000 = 84480$ kN/m;

. Parâmetro $L_e = \frac{23.3}{(nt_f E_f)^{0.58}}$: $L_e = \frac{23.3}{(84480)^{0.58}} = 32.35$ mm;

. Parâmetro $k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3}$: $k_1 = \left(\frac{35}{27}\right)^{2/3} = 1.1889$;

. Parâmetro $k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f}$: $k_2 = \frac{259 - 32.35}{259} = 0.8751$;

. Parâmetro $k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11.9 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75$: $k_v = \frac{1.1889 \times 0.8751 \times 32.35 \times 10^{-3}}{11.9 \times 0.0155} = 0.1825 \leq 0.75$;

. Extensão efectiva no CFRP ($\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu}$): $\varepsilon_{fe} = 0.1825 \times 0.015 = 0.00274$, ou seja, $\varepsilon_{fe} = 0.00283 \leq 0.004$ (valor máximo admissível para a extensão efectiva).

e) Cálculo da tensão efectiva do CFRP

A tensão efectiva no CFRP, f_{fe} , é obtida multiplicando o módulo de elasticidade do compósito, E_f , pela extensão longitudinal efectiva no CFRP, ε_{fe} . Assim, o valor adoptado para a tensão efectiva no CFRP foi de $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 240000000 \times 0.00274 = 657.6 \text{ MPa}$.

f) Definição da solução de reforço

A solução de reforço com mantas de CFRP foi obtida impondo que a sua contribuição para a resistência ao esforço transversal, V_f , fosse semelhante à média dos valores de V_f referentes às três soluções de laminados com a maior percentagem de CFRP (Tabela A.7), ou seja, $V_f \cong 62.8 \text{ kN}$. Assim:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f}{s_f} = 62.80 \text{ kN};$$

$$s_f = \frac{4 \times (0.000176) \times 0.06 \times 657600 \times 0.259}{62.8} = 0.115 \text{ m}.$$

Face ao critério escolhido para a distribuição dos CFRP, descrito na secção 4.2.1 do capítulo 4 (Figura 4.3), a solução de reforço adoptada foi ***sete faixas com duas camadas de manta em forma de U com 6 cm de largura e um espaçamento de 11.4 cm (o mesmo que a solução para a percentagem intermédia de CFRP onde apenas foi aplicada uma camada de manta)***.

v) Quantificação dos reforços de CFRP para as vigas com $\rho_{sw} = 0.17\%$

De forma a avaliar o efeito da percentagem de armadura transversal na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP, as seis soluções de reforço (ver Tabela A.8) correspondentes às duas percentagens mais baixas de CFRP (cada uma com três orientações do CFRP) foram aplicadas em modelos de betão armado (Figura A.12) contendo no vão de corte a estribos verticais (dois ramos) de aço 6 mm de diâmetro afastados de 180 mm ($\phi 6@180\text{mm}$, $\rho_{sw} = 0.17\%$). Com o objectivo de se avaliar a eficácia da técnica NSM, por comparação directa com a técnica da colagem externa (EBR), as soluções de reforço correspondentes às duas percentagens mais baixas de manta de CFRP foram aplicadas em modelos de betão armado iguais ao representado da Figura A.12 ($\phi 6@180\text{mm}$ no vão de corte a , $\rho_{sw} = 0.17\%$).

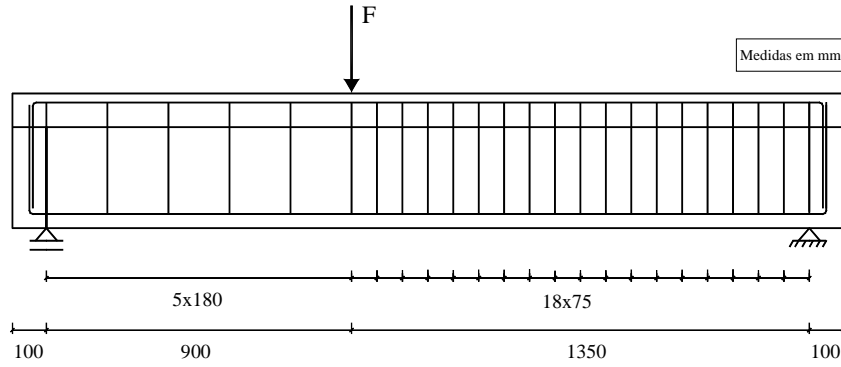


Figura A.12 - Modelo de betão armado que foi reforçado com CFRP ($\rho_{sw} = 0.17\%$).

A contribuição dos estribos de aço, colocados verticalmente no menor vão de corte da viga representada na Figura A.12, para a resistência ao esforço transversal foi obtida por intermédio da expressão (A.5):

$$V_s = 0.9 \times d_s \times \frac{A_{sw}}{s} \times f_{sy} = 0.9 \times 0.359 \times \frac{2 \times 0.28 \times 10^{-4}}{0.18} \times 600000 = 60.3 \text{ kN}.$$

Das soluções de reforço de CFRP que seriam executadas no modelo de betão armado representado na Figura A.12, a que apresentava a maior contribuição previsível para a resistência ao esforço transversal era a referente à percentagem intermédia de laminados a 45° CFRP ($V_f = 44.7 \text{ kN}$). A viga com esta solução de reforço foi designada por 4S-7LI45-B. O valor do esforço transversal resistente da viga 4S-7LI45-B, no menor vão de corte, foi determinado usando a expressão (3.3):

$$V_{res.} = V_c + V_s + V_f = 54.9 + 60.3 + 44.7 = 159.9 \text{ kN}.$$

Atendendo ao modelo estrutural representado na Figura A.5, a carga previsível de rotura por corte (F_{rotura}^{corte}) da viga 4S-7LI45-B foi obtida por intermédio da seguinte expressão:

$$V_{res.} = 0.6 F_{rotura}^{corte} \Rightarrow F_{rotura}^{corte} = 266.5 \text{ kN}.$$

Assim, atendendo aos valores previsíveis da carga de rotura da viga 4S-7M-B em termos de corte e de flexão, respectivamente, $F_{rotura}^{corte} = 266.5 \text{ kN}$ e $F_{rotura}^{flexão} = 544.8 \text{ kN}$, foi assegurada a rotura por corte da viga que, contendo $\rho_{sw} = 0.17\%$, tinha o valor da carga de rotura previsto mais alto

$$F_{rotura}^{flexão} / F_{rotura}^{corte} = 2.04.$$

A pormenorização de todas as soluções de reforço de CFRP obtidas para as vigas da série B estão representadas nas Figuras 4.24 e 4.25 e na Tabela 4.7 do Capítulo 4. Nas séries de vigas C e D foram ensaiadas algumas das soluções de reforço testadas na série B. Desta forma, não houve necessidade de efectuar qualquer tipo de pré-dimensionamento das soluções de reforço de CFRP para o caso das séries C e D.

ANEXO B - Composição do betão e resultados de ensaios de caracterização dos materiais

Neste anexo apresentam-se:

1. Composição do betão utilizado para a concepção das vigas;
2. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial para caracterização do betão;
3. Resultados dos ensaios de tracção uniaxial para caracterização dos aços das armaduras;
4. Resultados dos ensaios de tracção uniaxial para caracterização dos laminados de CFRP.

1. Composição do betão utilizado para a concepção das vigas

1.1 Programa experimental do Capítulo 3 (vigas de secção transversal rectangular)

Tabela B.1 - Composição do betão das vigas ensaiadas no programa experimental do Capítulo 3.

Material	Quantidade por m ³ de betão
Cimento 42.5 R	324 Kg
Cinzas Volantes	91 Kg
Brita 1 (5-15)	863 Kg
Areia média	739 Kg
Areia fina	132 Kg
Aditivo CHRYSOPLAST 768	2.78 Kg
Água	187 l

1.2 Programa experimental do Capítulo 4 (vigas T)

• Vigas da série A

Tabela B.2 - Composição do betão das vigas da série A do programa experimental do Capítulo 4 (vigas T).

Material	Quantidade por m ³ de betão
Cimento Tipo I 42.5 R (CEM I 42.5 R)	275 kg
Cinzas Volantes	-
Brita 4/6	236 kg
Brita 6/14	387 kg
Brita 14/20	400 kg
Areia Média	425 kg
Areia Fina	478 kg
Aditivo CHRYSOPLAST 768	2.75 Kg
Água	132 l

- Vigas da série B

Tabela B.3 - Composição do betão das vigas da série B do programa experimental do Capítulo 4 (vigas T).

Material	Quantidade por m ³ de betão
Cimento Tipo I 42.5 R (CEM I 42.5 R)	275 kg
Cinzas Volantes	-
Brita 4/6	264 kg
Brita 6/14	408 kg
Brita 14/20	400 kg
Areia Média	444 kg
Areia Fina	478 kg
Aditivo CHRYSOPLAST 768	2.75 Kg
Água	121 l

- Vigas da série C

Tabela B.4 - Composição do betão das vigas da série C do programa experimental do Capítulo 4 (vigas T).

Material	Quantidade por m ³ de betão
Cimento Tipo II 42.5 R (CEM II 42.5 R)	200 kg
Cinzas Volantes	-
Brita 4/6	153 kg
Brita 6/14	366 kg
Brita 14/20	431 kg
Areia Média	474 kg
Areia Fina	643 kg
Aditivo CHRYSOPLAST 768	2.0 Kg
Água	88 l

- Vigas da série D

Tabela B.5 - Composição do betão das vigas da série D do programa experimental do Capítulo 4 (vigas T).

Material	Quantidade por m ³ de betão
Cimento Tipo II 42.5 R (CEM II 42.5 R)	440 kg
Cinzas Volantes	-
Brita 4/6	152 kg
Brita 6/14	346 kg
Brita 14/20	450 kg
Areia Média	579 kg
Areia Fina	190 kg
Aditivo CHRYSOPLAST 768	4.4 Kg
Água	161 l

2. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial para caracterização do betão

2.1 Programa experimental do Capítulo 3 (vigas de secção transversal rectangular)

Tabela B.6 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (betão das vigas da série A).

Provete	Idade do betão [dias]	Tensão máxima de compressão [MPa]
CIL - 1	28	37.3
CIL - 2	28	36.8
CIL - 3	28	38.7
CIL - 4	227*	46.7
CIL - 5	227*	51.0
CIL - 6	227*	49.8

* Idade do betão à data dos ensaios das vigas.

Tabela B.7 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (betão das vigas da série B).

Provete	Idade do betão [dias]	Tensão máxima de compressão [MPa]
CIL - 1	28	51.6
CIL - 2	28	48.9
CIL - 3	28	48.0
CIL - 4	105*	55.4
CIL - 5	105*	58.6
CIL - 6	105*	52.2
CIL - 7	105*	58.7

* Idade do betão à data dos ensaios das vigas.

2.2 Programa experimental do Capítulo 4 (vigas T)

• Vigas da série A

Tabela B.8 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (betão das vigas T da série A).

Provete	Idade do betão [dias]	Tensão máxima de compressão [MPa]
CIL - 1	28	25.7
CIL - 2	28	27.3
CIL - 3	28	26.1
CIL - 3	28	25.0
CIL - 4	70*	31.6
CIL - 5	70*	30.8
CIL - 6	70*	31.0
CIL - 7	70*	30.8

* Idade do betão à data dos ensaios das vigas.

- Vigas da série B

Tabela B.9 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (betão das vigas T da série B).

Provete	Idade do betão [dias]	Tensão máxima de compressão [MPa]
CIL - 1	28	34.0
CIL - 2	28	35.0
CIL - 3	28	34.0
CIL - 4	28	28.9
CIL - 5	28	29.8
CIL - 6	28	28.5
CIL - 7	106*	41.0
CIL - 8	106*	41.4
CIL - 9	106*	40.0
CIL - 10	106*	38.1
CIL - 11	106*	38.4
CIL - 12	106*	39.3

* Idade do betão à data dos ensaios das vigas.

- Vigas da série C

Tabela B.10 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (betão das vigas T da série C).

Provete	Idade do betão [dias]	Tensão máxima de compressão [MPa]
CIL - 1	28	16.5
CIL - 2	28	15.8
CIL - 3	28	15.3
CIL - 4	51 *	18.9
CIL - 5	51 *	18.1
CIL - 6	51 *	18.7

* Idade do betão à data dos ensaios das vigas.

- Vigas da série D

Tabela B.11 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (betão das vigas T da série D).

Provete	Idade do betão à data do ensaio das vigas [dias]	Tensão máxima de compressão [MPa]
CIL - 1	97	63.2
CIL - 2	97	54.7
CIL - 3	97	62.5
CIL - 4	97	57.8
CIL - 5	97	53.4
CIL - 6	97	63.2
CIL - 7	97	57.1
CIL - 8	97	63.0

3. Resultados dos ensaios de tracção uniaxial para caracterização dos aços das armaduras

3.1 Programa experimental do Capítulo 3 (vigas de secção transversal rectangular)

Tabela B.12 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial (aço das vigas da série A).

Provete	$\phi 6$ (longitudinal)	$\phi 6$ (transversal)	$\phi 10$	$\phi 12$
P1	626/707	538/687	454/577	568/665
P2	625/704	539/696	456/578	582/676
P3	615/695	542/700	481/588	572/674

Nota: Para cada provete de cada tipo de aço são apresentados dois valores de tensão [MPa]: o da esquerda refere-se à tensão de cedência e o da direita refere-se à tensão máxima.

Tabela B.13 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial (aço das vigas da série B).

Provete	$\phi 6$ (longitudinal)	$\phi 6$ (transversal)	$\phi 10$	$\phi 12$
P1	616/696	538/687	454/577	573/673
P2	623/696	539/696	456/578	583/683
P3	615/680	542/700	481/588	558/663

Nota: Para cada provete de cada tipo de aço são apresentados dois valores de tensão [MPa]: o da esquerda refere-se à tensão de cedência e o da direita refere-se à tensão máxima.

3.2 Programa experimental do Capítulo 4 (vigas T)

• Vigas da série A

Tabela B.14 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial (aço das vigas T da série A).

Provete	$\phi 6$	$\phi 12$	$\phi 16$	$\phi 25$
P1	530/595	446/568	445/563	450/580
P2	536/592	441/564	444/564	439/575
P3	533/589	450/561	453/556	442/568

Nota: Para cada provete de cada tipo de aço são apresentados dois valores de tensão [MPa]: o da esquerda refere-se à tensão de cedência e o da direita refere-se à tensão máxima.

• Vigas da série B

Tabela B.15 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial (aço das vigas T da série B).

Provete	$\phi 6$	$\phi 12$	$\phi 16$	$\phi 32$
P1	533/584	450/590	445/566	715/902
P2	533/594	453/590	458/574	784/905
P3	561/608	457/593	449/565	777/899
P4	542/594	449/589	436/559	-
P5	531/591	456/592	-	-
P6	550/594	454/591	-	-

Nota: Para cada provete de cada tipo de aço são apresentados dois valores de tensão [MPa]: o da esquerda refere-se à tensão de cedência e o da direita refere-se à tensão máxima.

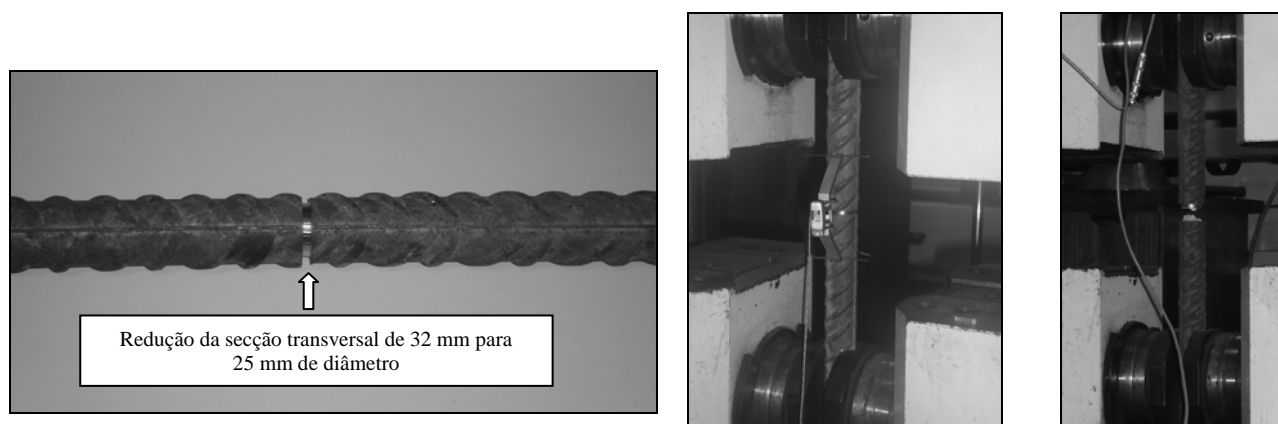


Figura B.1 - Ensaio de tracção de um varão de 32 mm de diâmetro.

• Vigas da série C

Tabela B.16 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial (aço das vigas T da série C).

Provete	φ6	φ12	φ16	φ32
P1	553/608	450/575	429/564	745/875
P2	528/587	453/578	430/569	728/893
P3	542/594	454/590	433/565	729/886
P4	541/601	456/580	422/552	-
P5	539/594	-	-	-
P6	531/587	-	-	-

Nota: Para cada provete de cada tipo de aço são apresentados dois valores de tensão [MPa]: o da esquerda refere-se à tensão de cedência e o da direita refere-se à tensão máxima.

• Vigas da série D

Tabela B.17 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial (aço das vigas T da série D).

Tensão	φ6	φ8	φ12	φ16 (Tipo 1)	φ16 (Tipo 2)	φ32
P1	553/598	471/609	454/575	412/552	540/653	725/908
P2	541/601	465/609	454/588	475/612	539/657	722/903
P3	555/601	471/615	449/577	424/563	549/666	702/914
P4	556/598	474/612	441/575	435/570	549/654	-
P5	537/591	-	-	426/565	-	-
P6	565/622	-	-	-	-	-

Nota: Para cada provete de cada tipo de aço são apresentados dois valores de tensão [MPa]: o da esquerda refere-se à tensão de cedência e o da direita refere-se à tensão máxima.

4. Resultados dos ensaios de tracção uniaxial para caracterização dos laminados de CFRP

4.1 Programa experimental do Capítulo 3 (vigas de secção transversal rectangular)

Tabela B.18 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial nos provetes de laminado de CFRP.

Provete	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de rotura à tracção [MPa]	Extensão longitudinal na rotura [%]
P1	166.9	2278.9	12.3
P2	163.2	2327.1	12.9
P3	167.2	2385.7	13.7
P4	164.0	*	*
P5	173.7	2322.4	14.0
P6	163.9	2115.4	12.1

* Problemas durante a fase final do ensaio.

4.2 Programa experimental do Capítulo 4 (vigas T)

• Vigas da série A

Tabela B.19 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial nos provetes de laminado de CFRP (série A).

Provete	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de rotura à tracção [MPa]
P1	*	*
P2	168.9	2883.4
P3	170.2	2884.1
P4	167.2	2970.1
P5	164.8	3044.8
P6	161.7	2980.0

* Problemas durante a fase final do ensaio.

• Vigas da série B

Tabela B.20 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial nos provetes de laminado de CFRP (série B).

Provete	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de rotura à tracção [MPa]
P1	165.8	2728.7
P2	173.7	2713.2
P3	176.2	2785.2
P4	172.6	2899.5
P5	166.5	2581.9
P6	170.6	2741.6

- Vigas da série C e D (nestas duas séries de vigas foram utilizados laminados do mesmo rolo)

Tabela B.21 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial nos provetes de laminado de CFRP (séries C e D).

Proвете	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de rotura à tracção [MPa]
P1	169.6	2873.9
P2	177.6	2811.0
P3	172.8	2916.0
P4	174.6	2770.4
P5	173.8	2793.0
P6	175.4	2959.9
P7	176.0	2811.3

ANEXO C - Informação relativa à extensometria colocada nos laminados e estribos de aço das vigas do programa experimental do Capítulo 4

Neste anexo apresenta-se a informação recolhida na extensometria colocada nos laminados e estribos de aço instrumentados das vigas ensaiadas no programa experimental do Capítulo 4. Concretamente, é apresentada a relação extensão no CFRP vs força aplicada e a extensão no estribo de aço vs força aplicada, até ao momento em que a viga atingiu a sua capacidade de carga máxima.

Para cada viga é apresentada a face onde os laminados instrumentados foram inseridos e a localização das secções onde os extensómetros foram colados, quer para o caso do CFRP como para o caso do estribo de aço. No caso do estribo a seta que aponta para a esquerda identifica o estribo colocado na face oposta à apresentada. O padrão de fendilhação apresentado em cada viga refere-se ao registado no final do ensaio.

1. Vigas da série A

1.1 Viga 2S-3LV-A

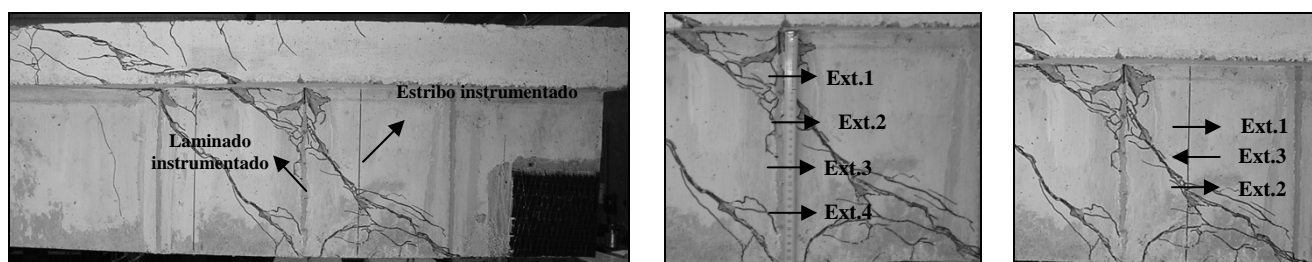


Figura C.1 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-3LV-A.

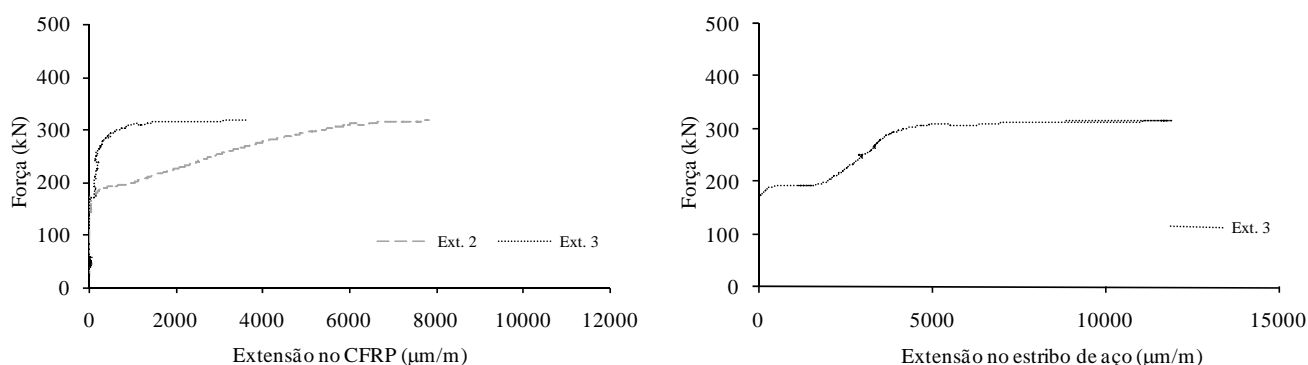


Figura C.2 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 2S-3LV-A.

1.2 Viga 2S-5LV-A

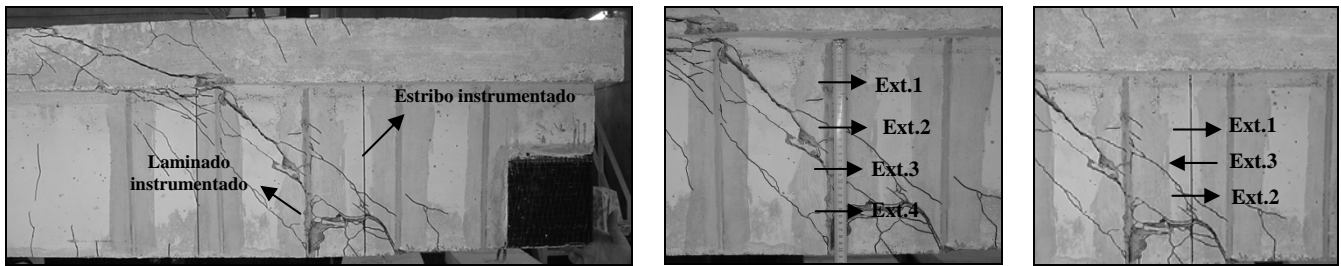


Figura C.3 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-5LV-A.

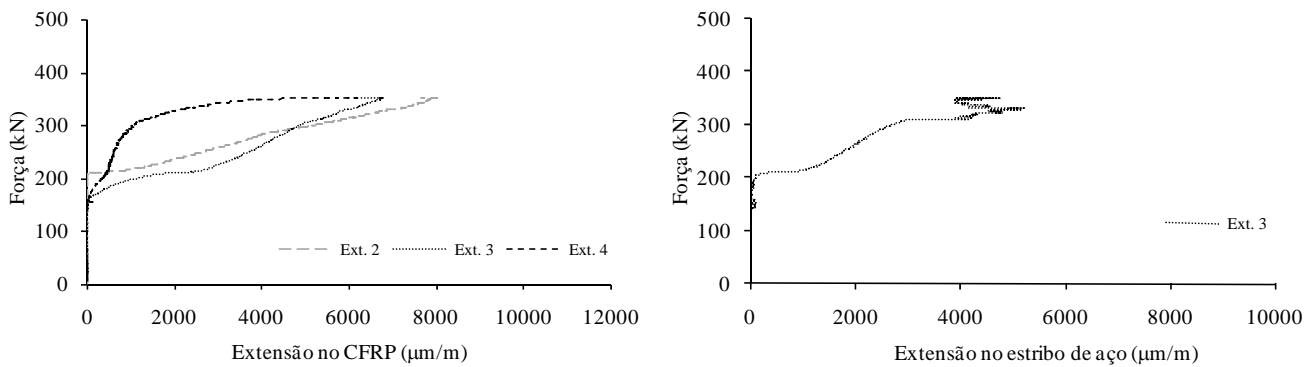


Figura C.4 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 2S-5LV-A.

1.3 Viga 2S-8LV-A

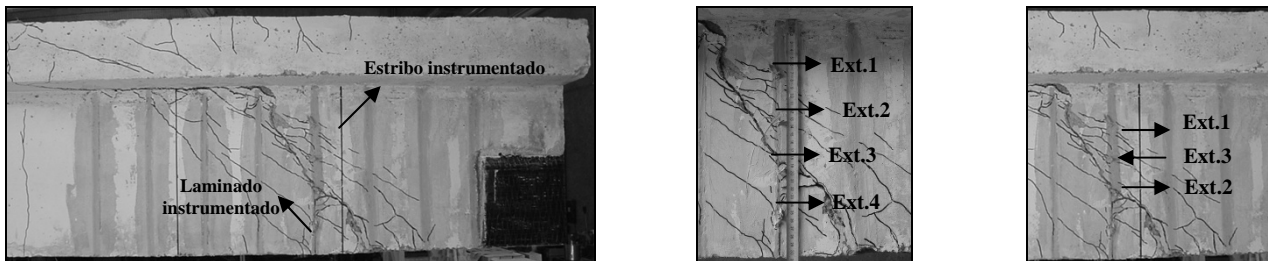


Figura C.5 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-8LV-A.

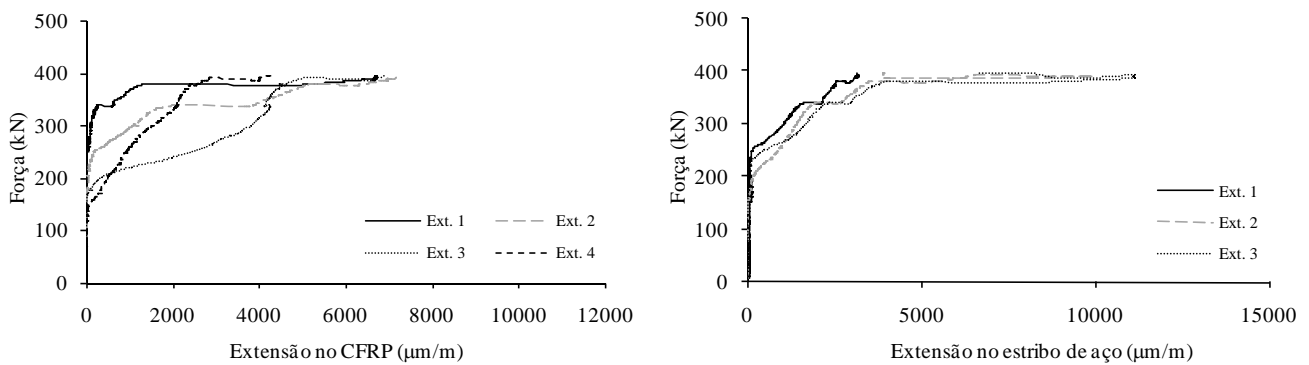


Figura C.6 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 2S-8LV-A.

1.4 Viga 2S-3LI45-A

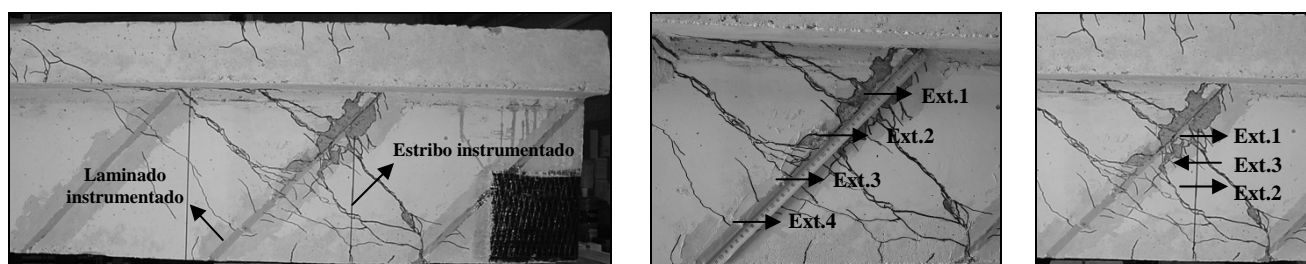


Figura C.7 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-3LI45-A.

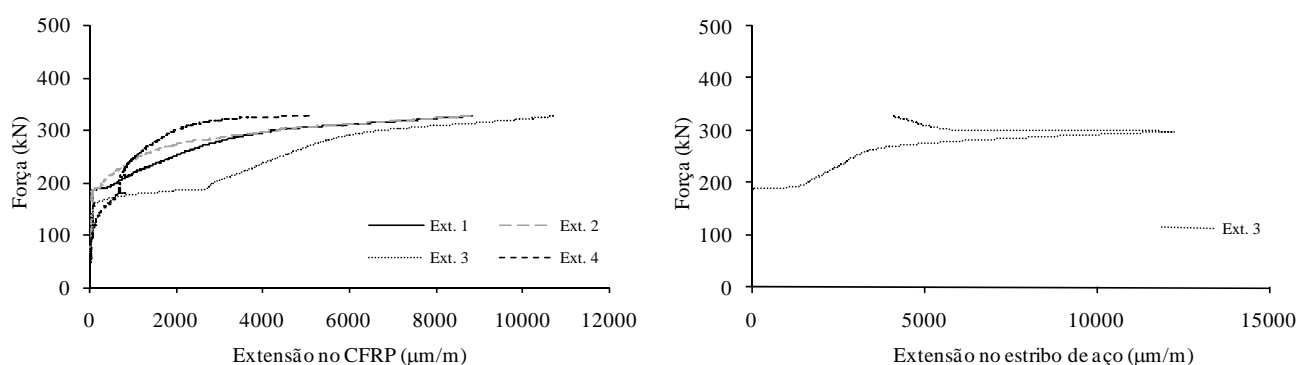


Figura C.8 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 2S-3LI45-A.

1.5 Viga 2S-5LI45-A

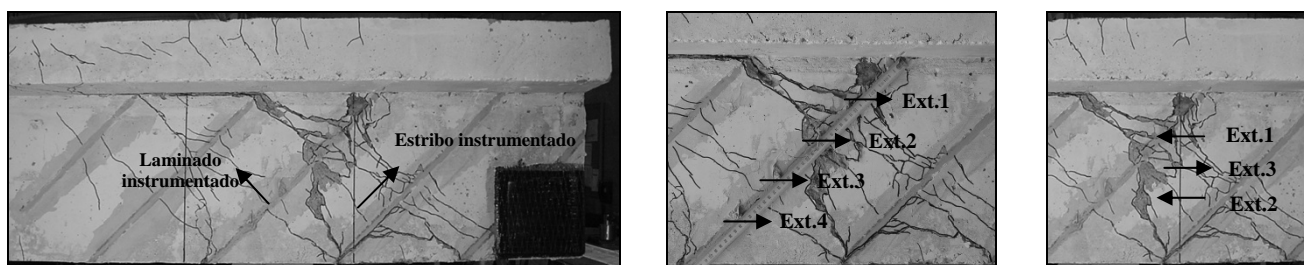


Figura C.9 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-5LI45-A.

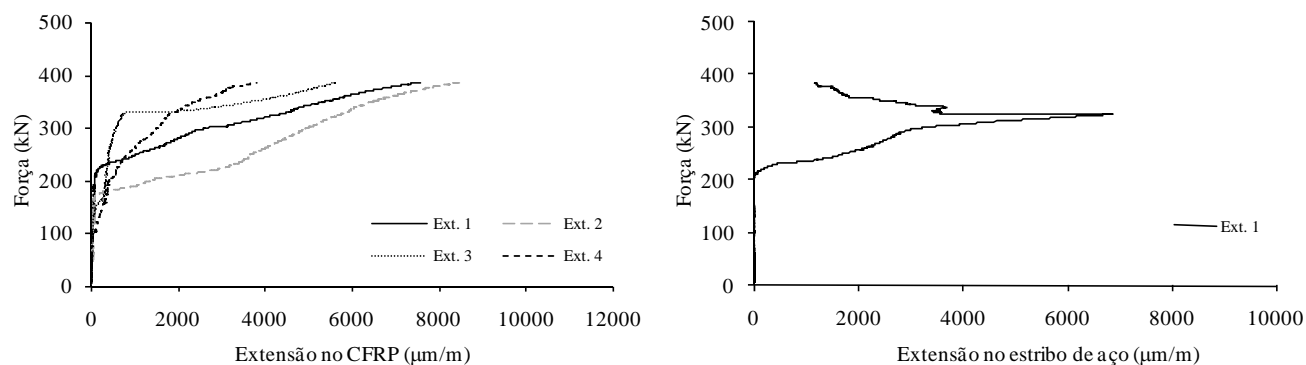


Figura C.10 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 2S-5LI45-A.

1.6 Viga 2S-8LI45-A

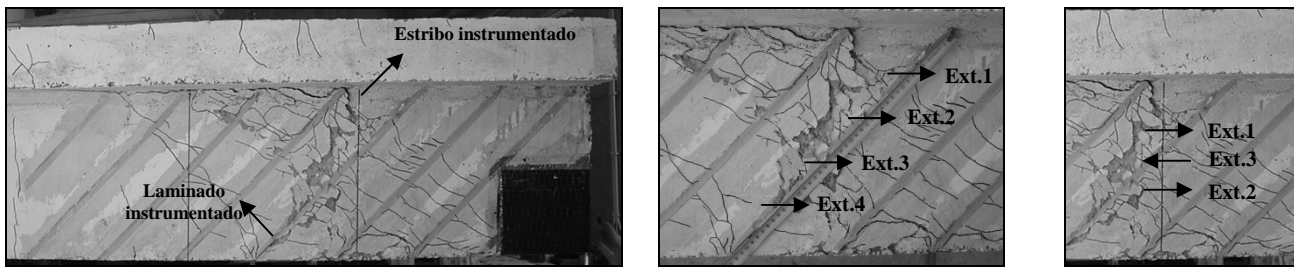


Figura C.11 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-8LI45-A.

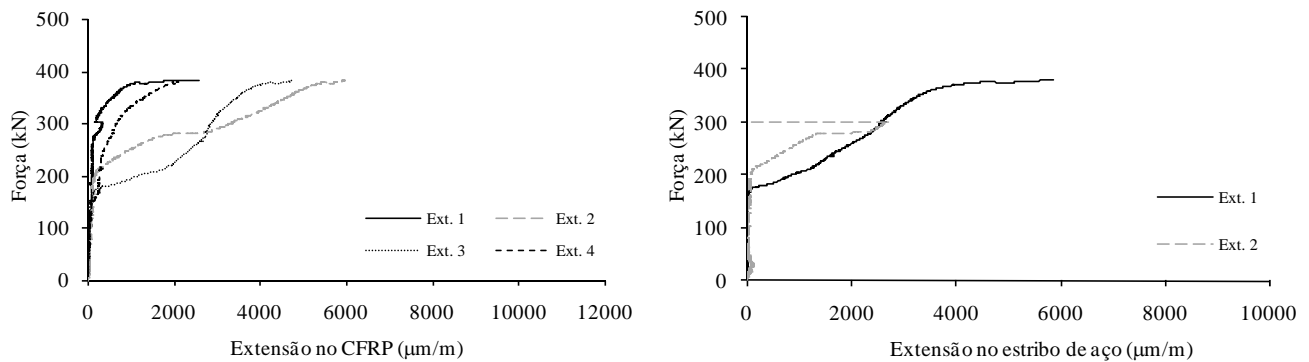


Figura C.12 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 2S-8LI45-A.

1.7 Viga 2S-5LI60-A

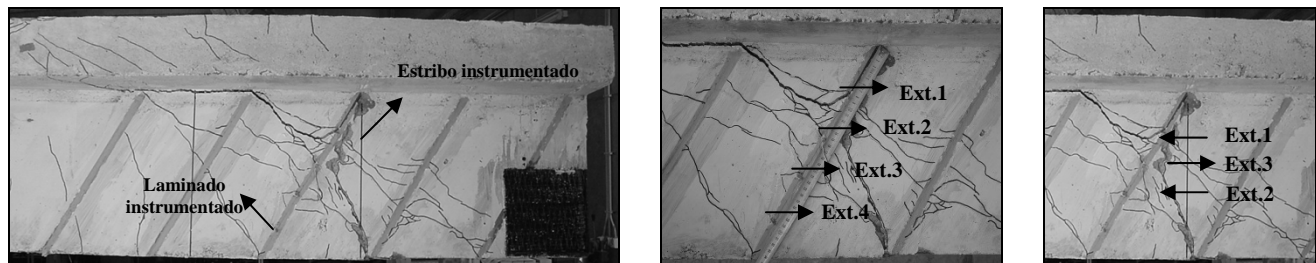


Figura C.13 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-5LI60-A.

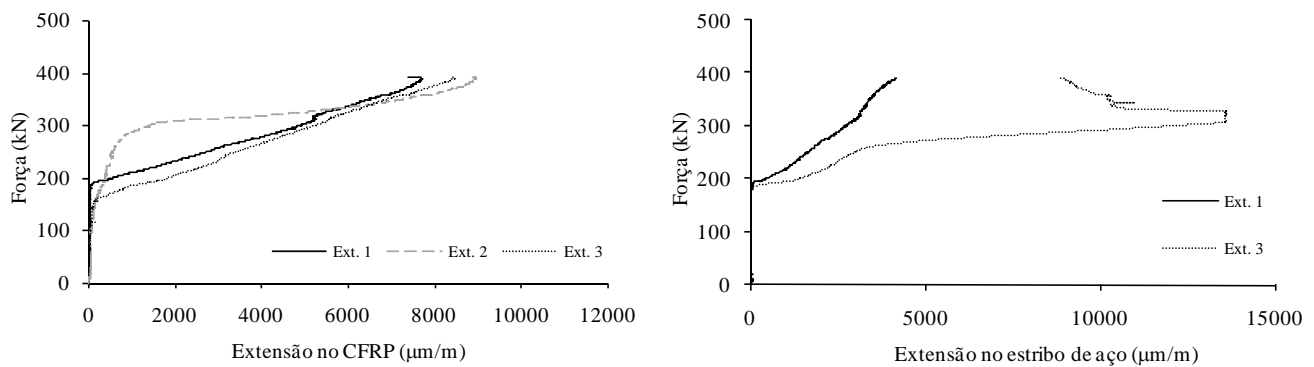


Figura C.14 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 2S-5LI60-A.

1.8 Viga 2S-7LI60-A

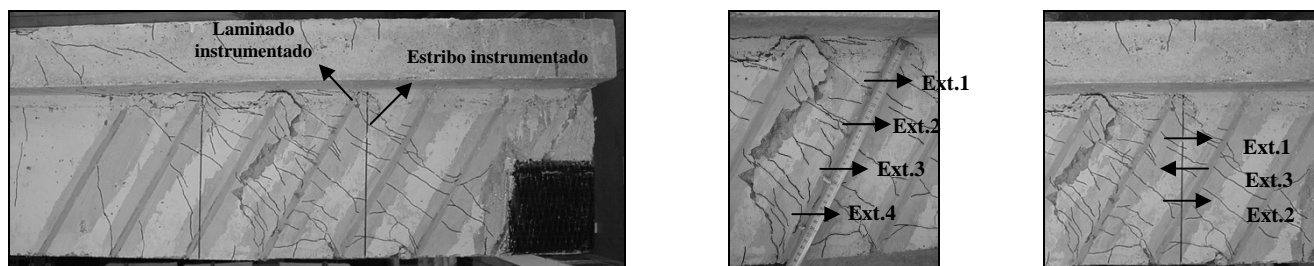


Figura C.15 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-7LI60-A.

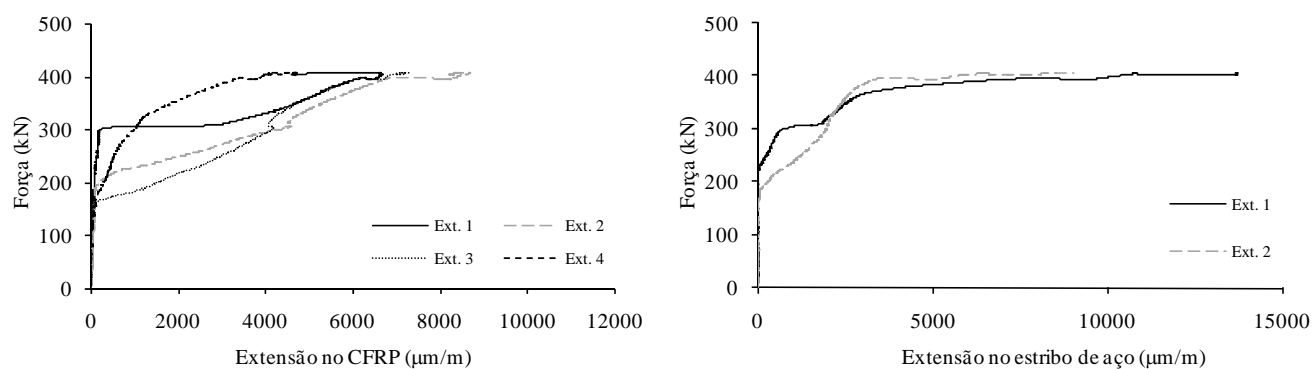


Figura C.16 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 2S-7LI60-A.

2. Vigas da série B

2.1 Viga 2S-4LV-B

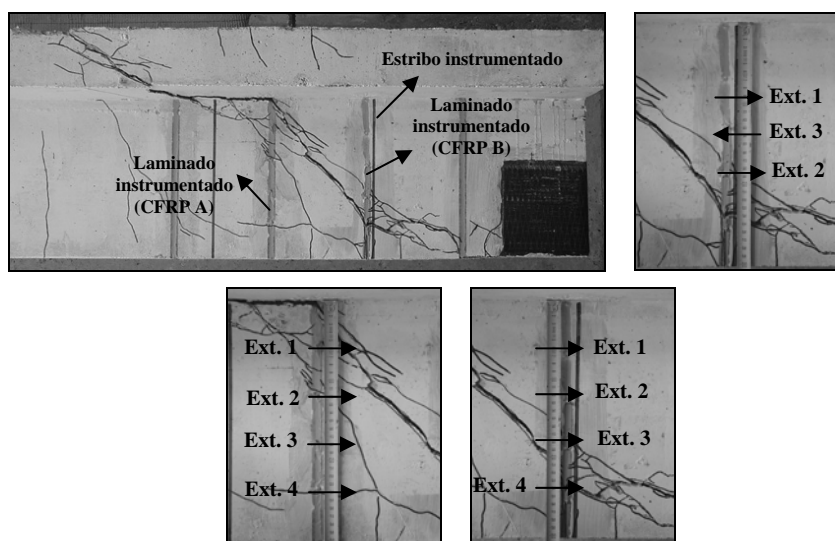


Figura C.17 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-4LV-B.

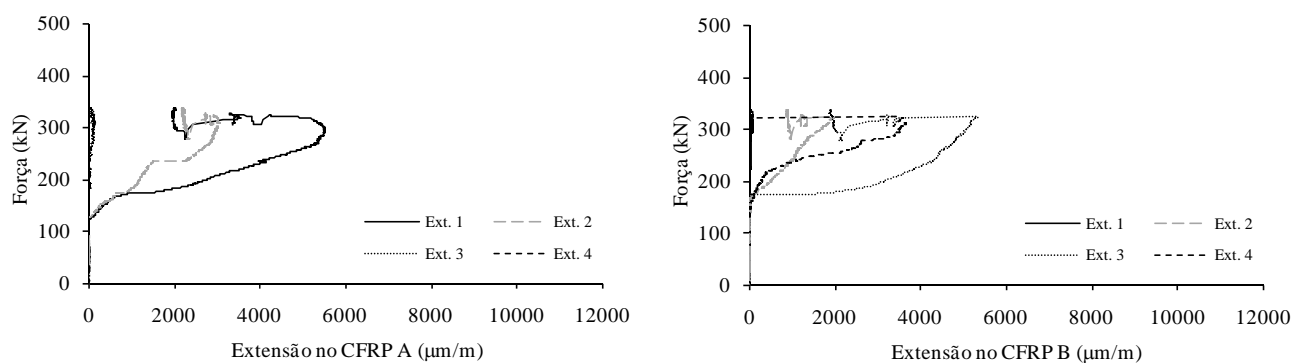


Figura C.18 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-4LV-B.

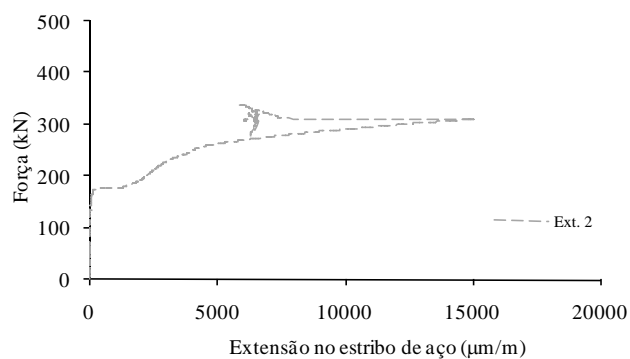


Figura C.19 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-4LV-B.

2.2 Viga 2S-4LI60-B

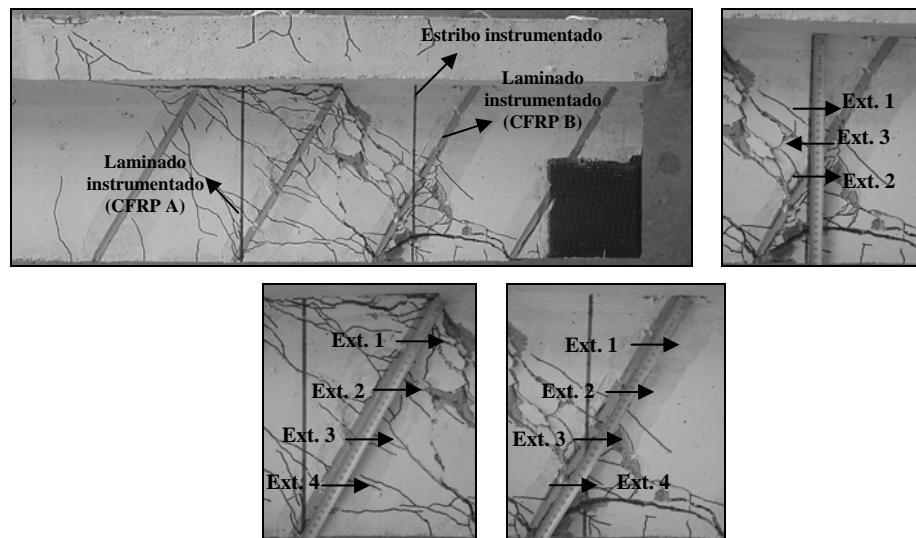


Figura C.20 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-4LI60-B.

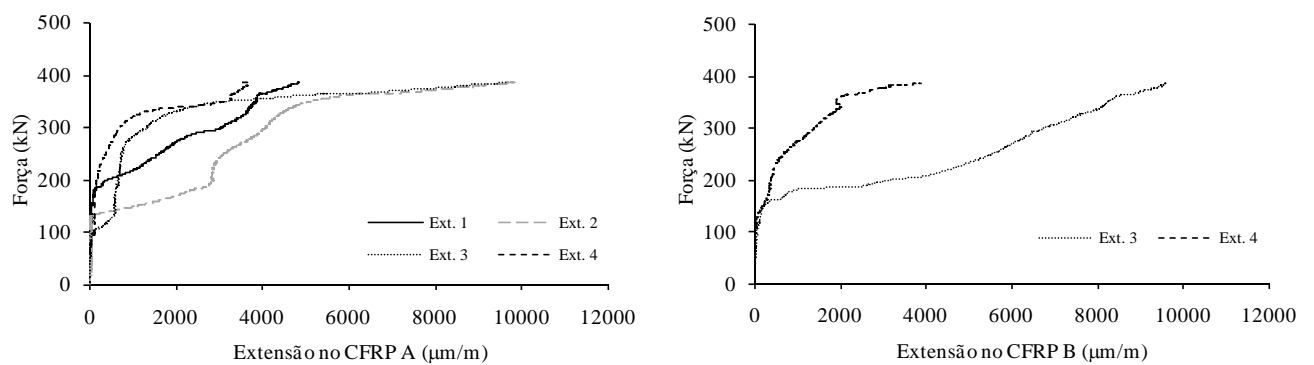


Figura C.21 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-4LI60-B.

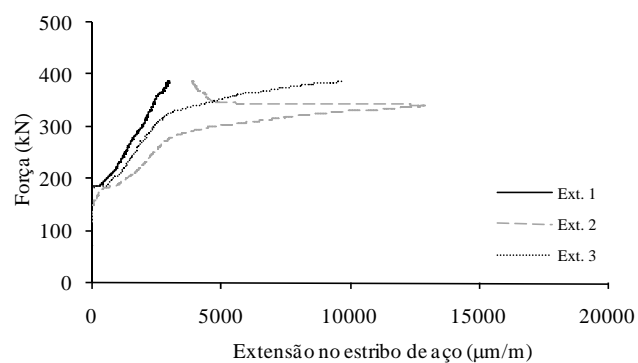


Figura C.22 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-4LI60-B.

2.3 Viga 2S-7LV-B

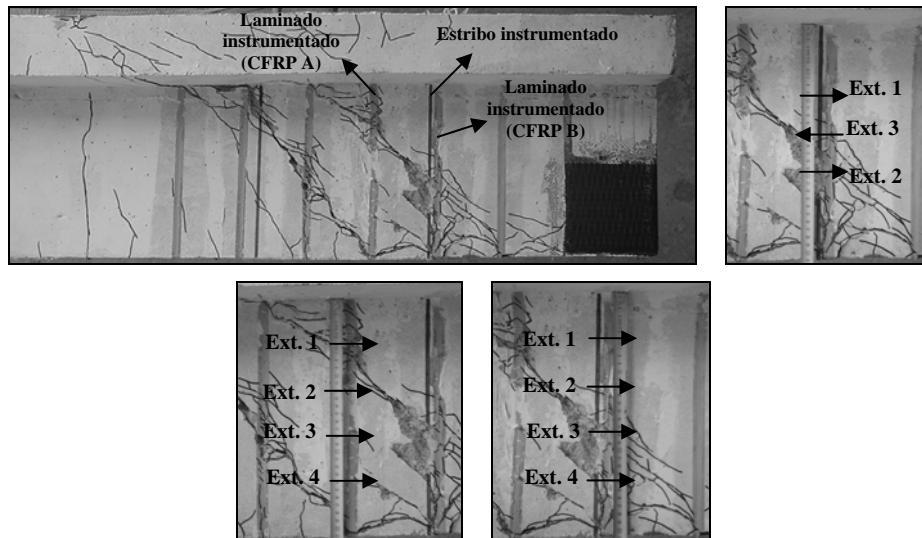


Figura C.23 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-7LV-B.

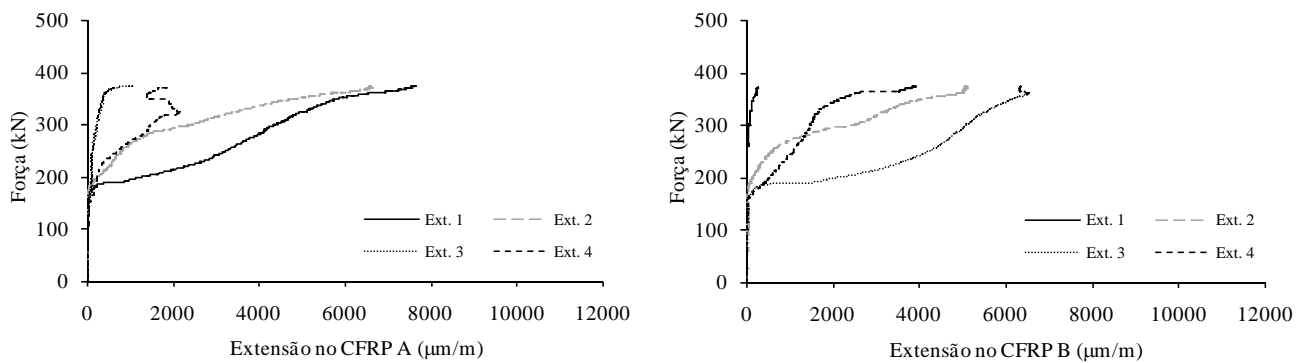


Figura C.24 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-7LV-B.

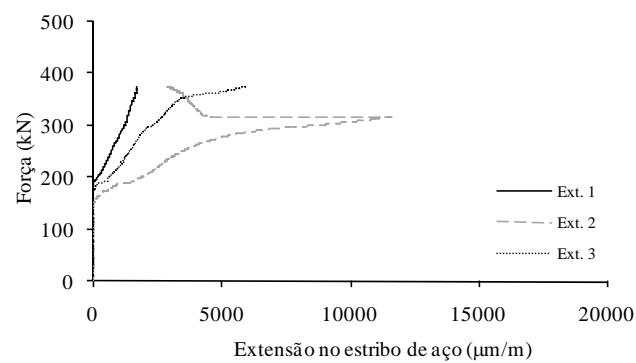


Figura C.25 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-7LV-B.

2.4 Viga 2S-7LI45-B

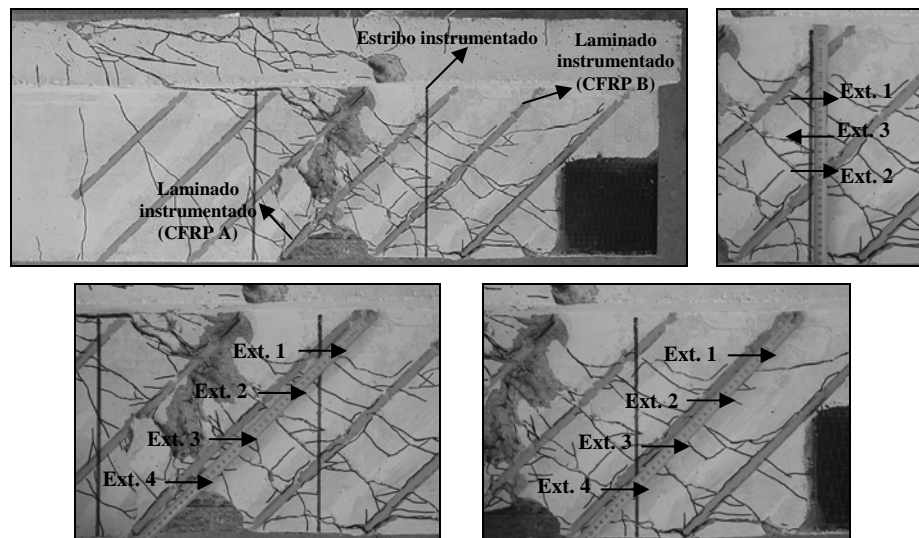


Figura C.26 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-7LI45-B.

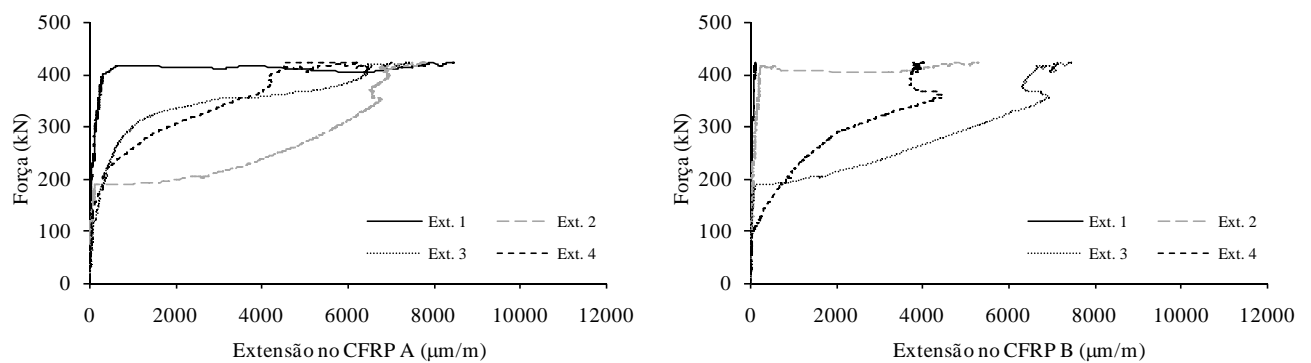


Figura C.27 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-7LI45-B.

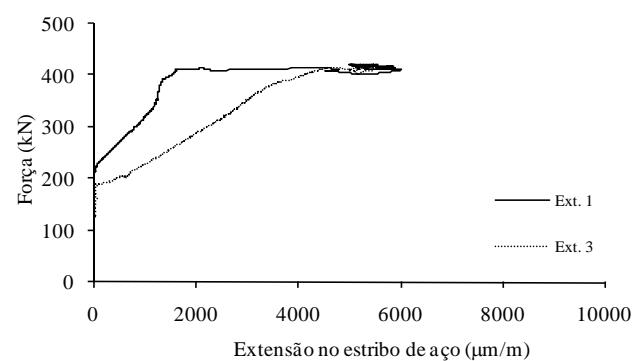


Figura C.28 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-7LI45-B.

2.5 Viga 2S-6LI60-B

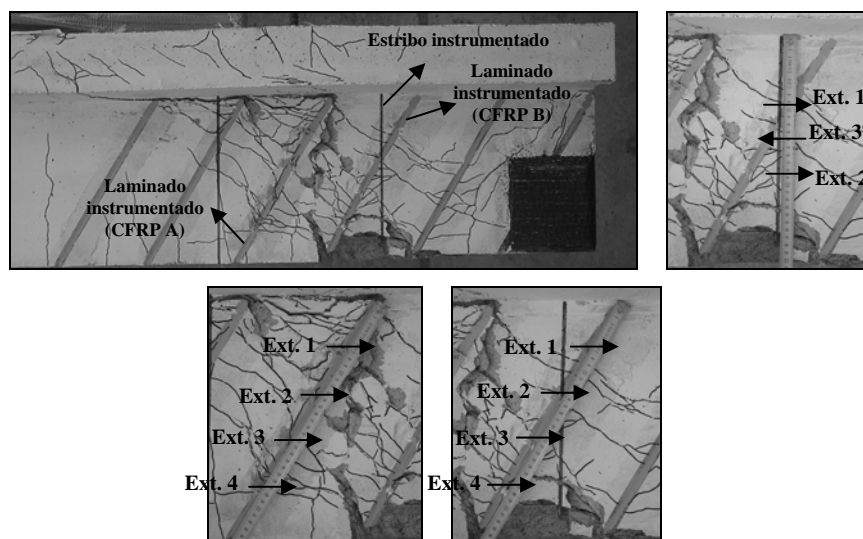


Figura C.29 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-6LI60-B.

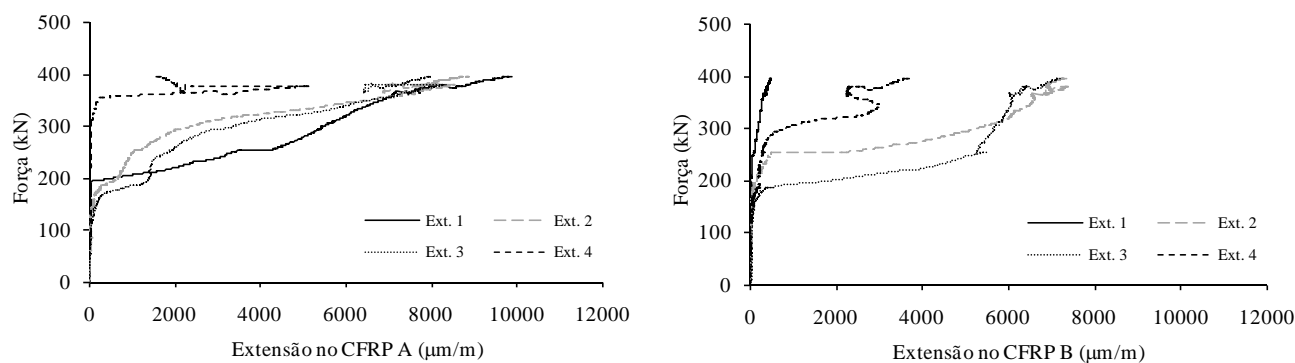


Figura C.30 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-6LI60-B.

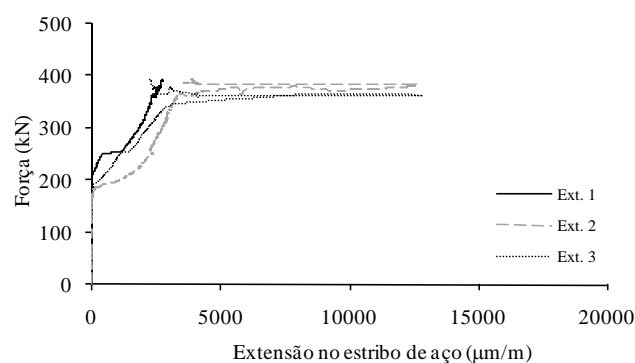


Figura C.31 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-6LI60-B.

2.6 Viga 2S-10LV-B

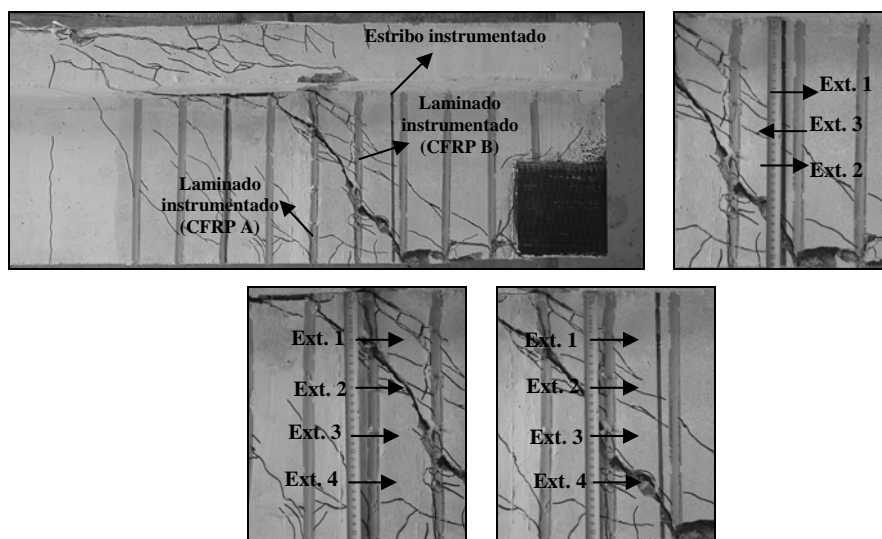


Figura C.32 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-10LV-B.

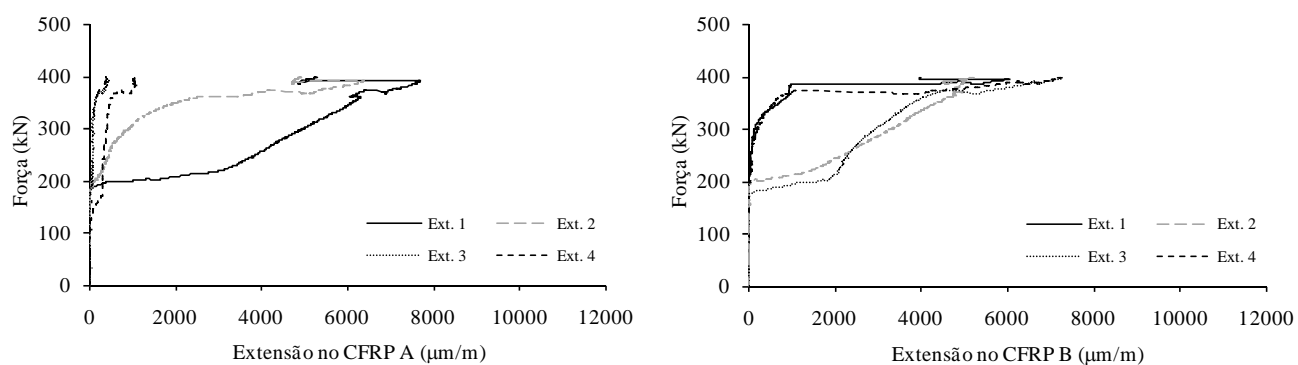


Figura C.33 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-10LV-B.

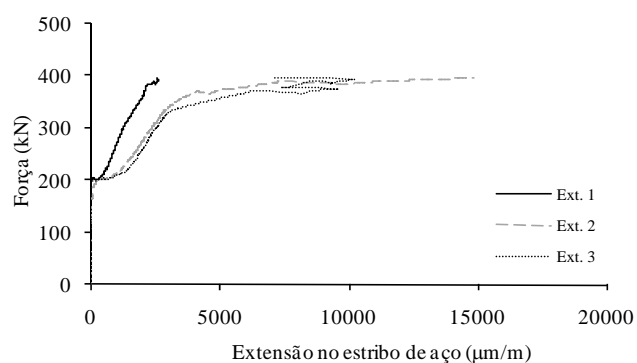


Figura C.34 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-10LV-B.

2.7 Viga 2S-10LI45-B

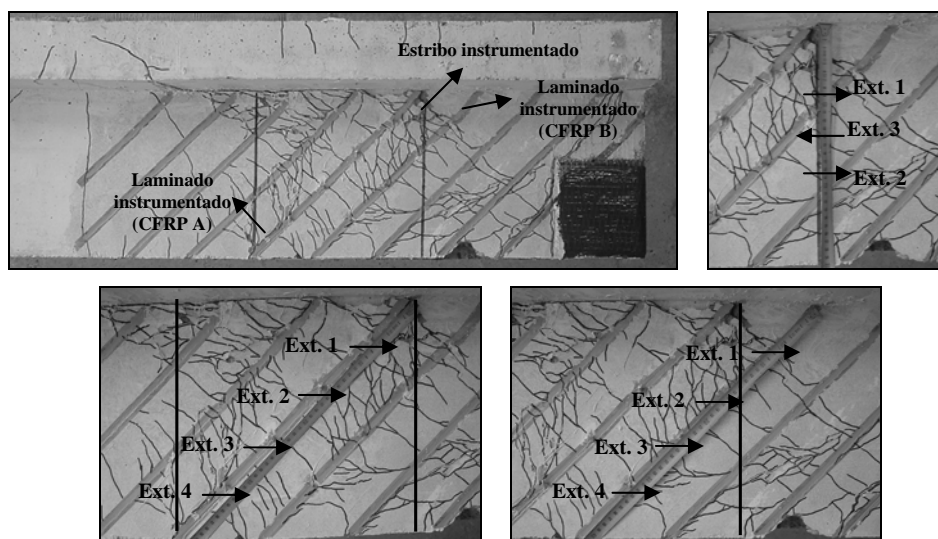


Figura C.35 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-10LI45-B.

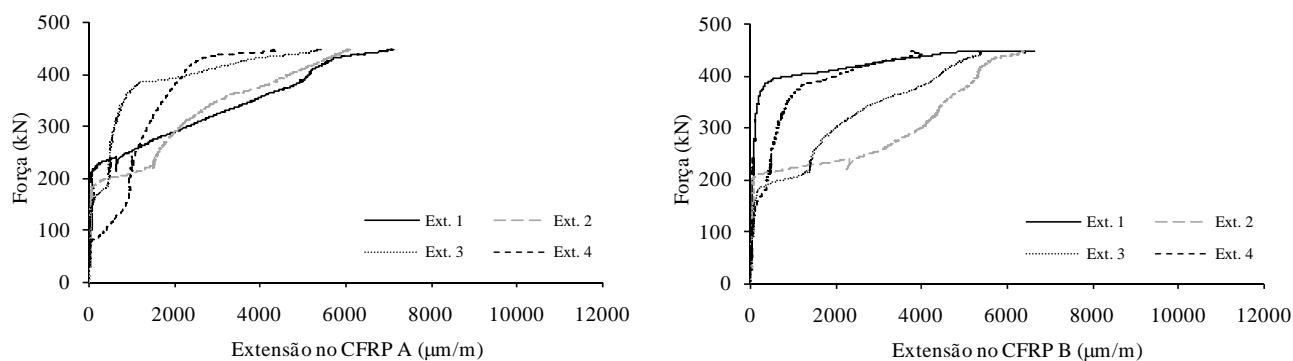


Figura C.36 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-10LI45-B.

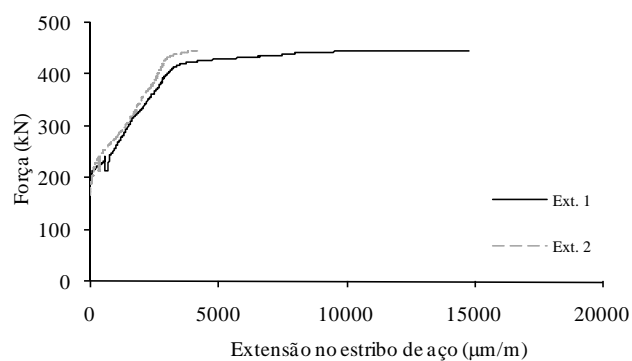


Figura C.37 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-10LI45-B.

2.8 Viga 2S-9LI60-B

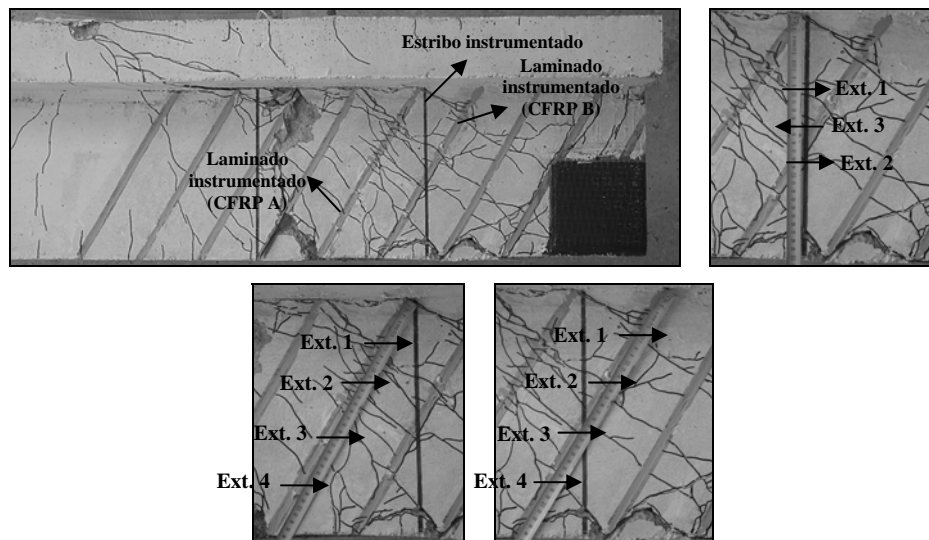


Figura C.38 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-9LI60-B.

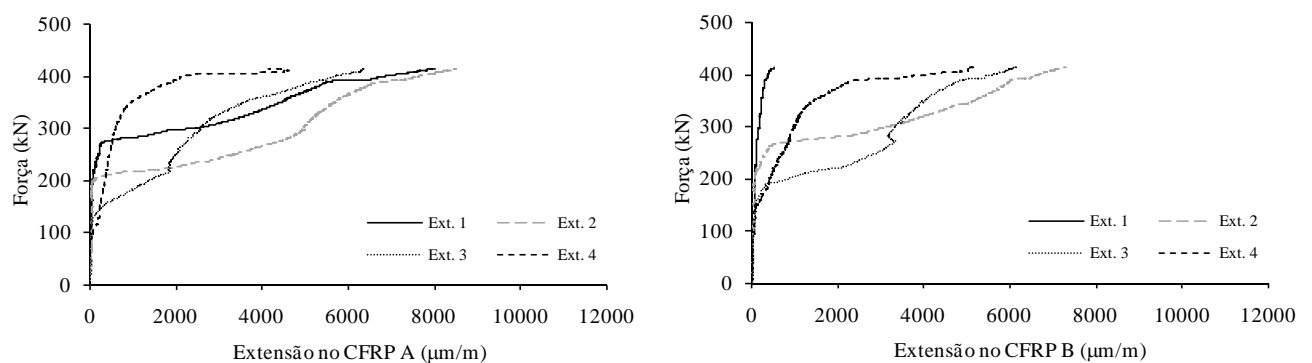


Figura C.39 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-9LI60-B.

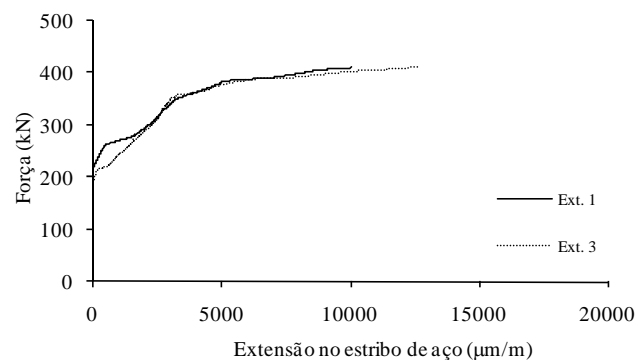


Figura C.40 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-9LI60-B.

2.9 Viga 4S-4LV-B

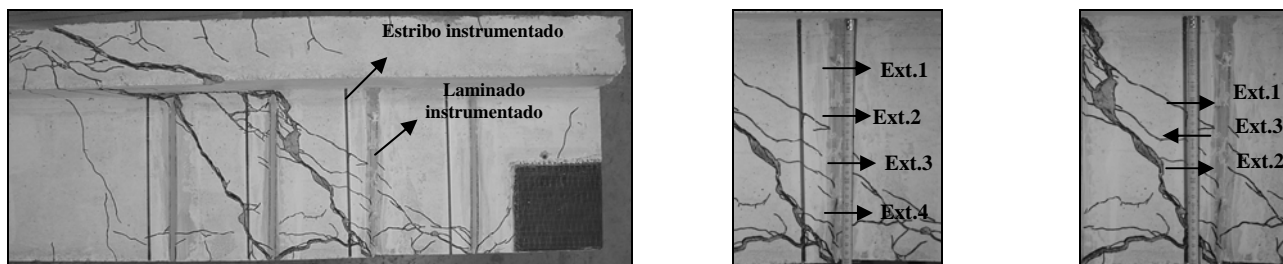


Figura C.41 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-4LV-B.

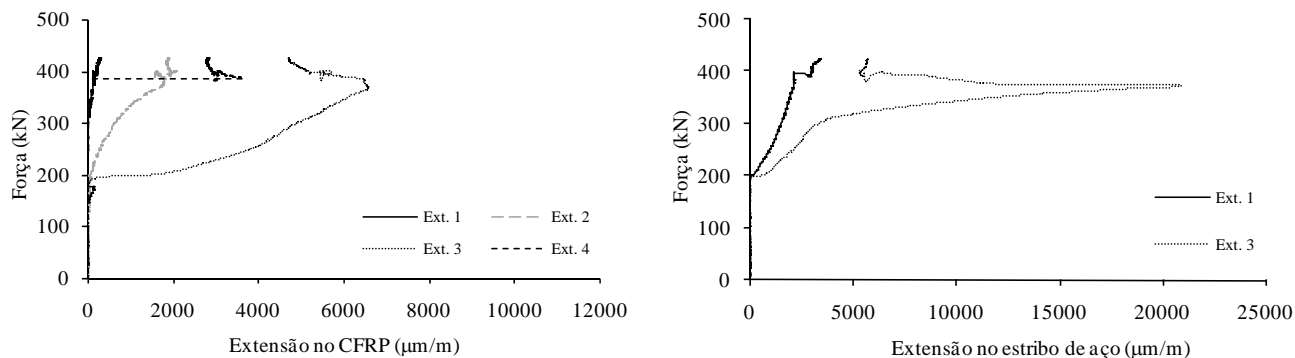


Figura C.42 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 4S-4LV-B.

2.10 Viga 4S-4LVa-B

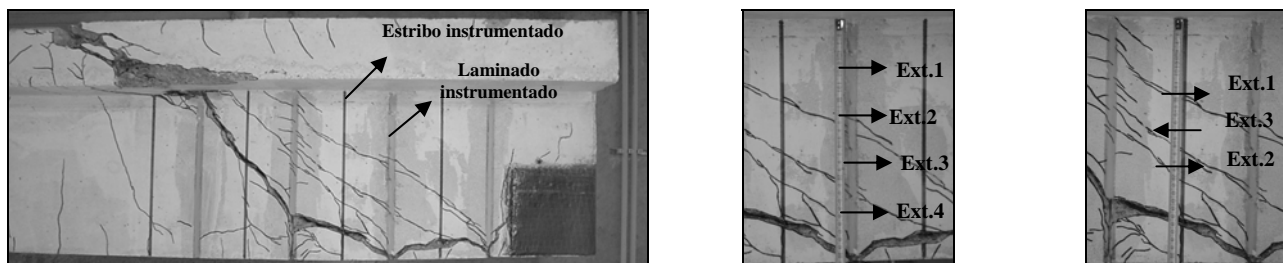


Figura C.43 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-4LVa-B.

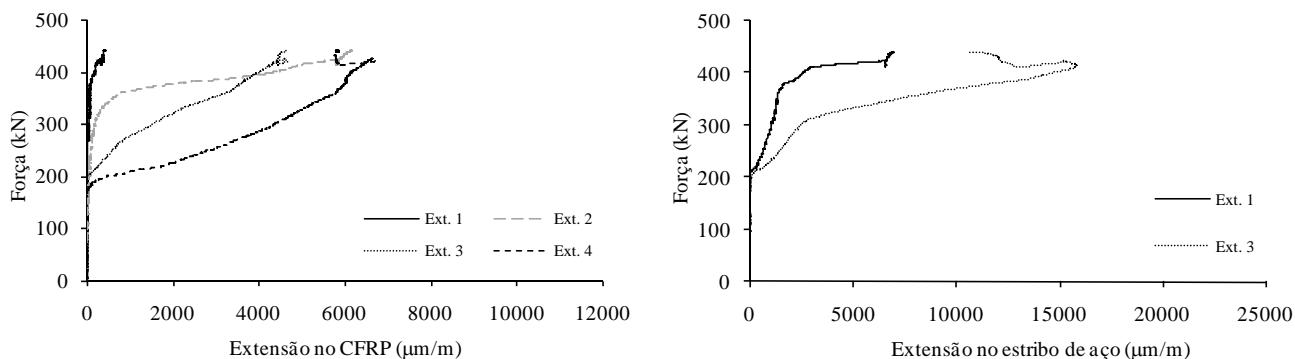


Figura C.44 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 4S-4LVa-B.

2.11 Viga 4S-4LI45-B

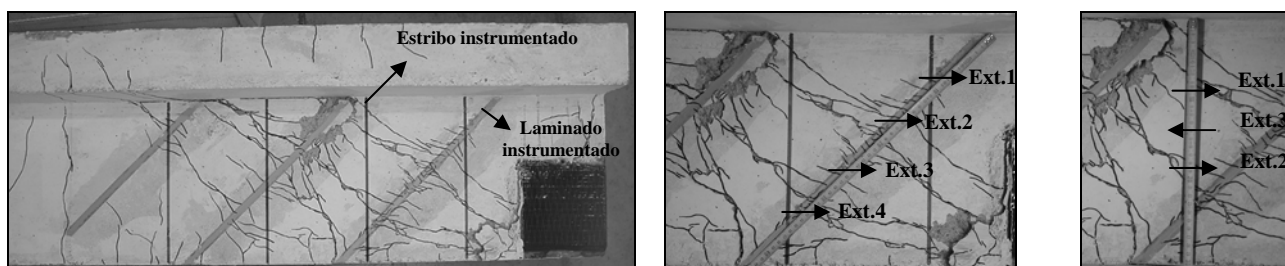


Figura C.45 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-4LI45-B.

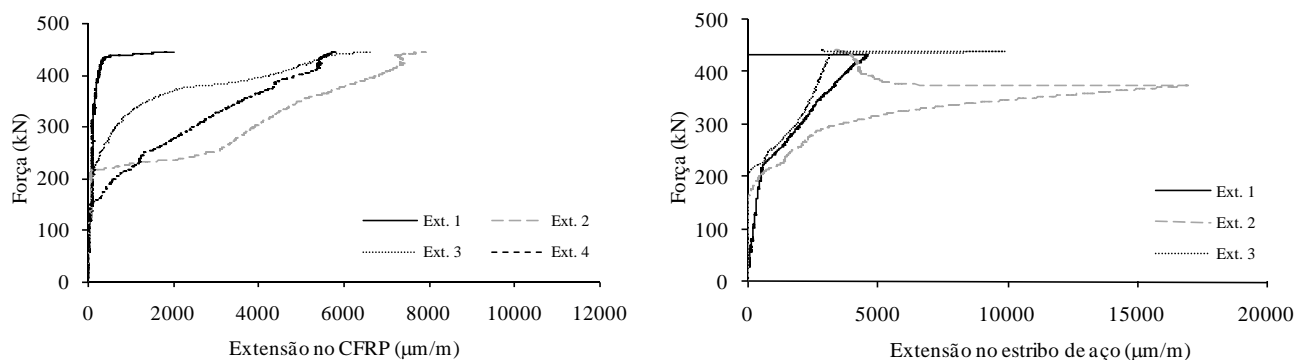


Figura C.46 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 4S-4LI45-B.

2.12 Viga 4S-4LI60-B

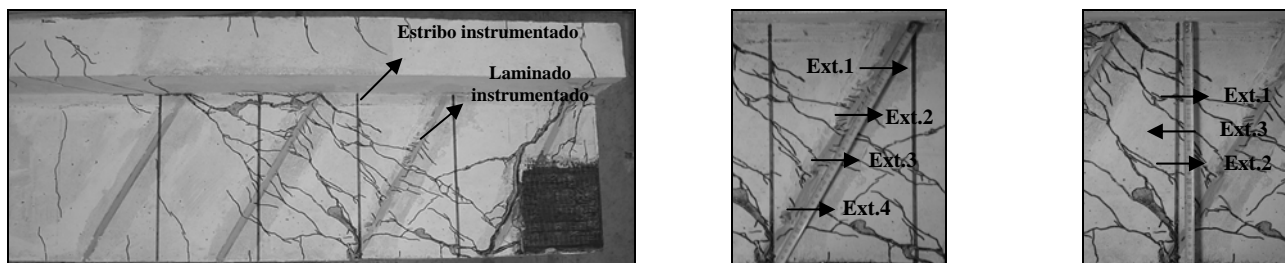


Figura C.47 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-4LI60-B.

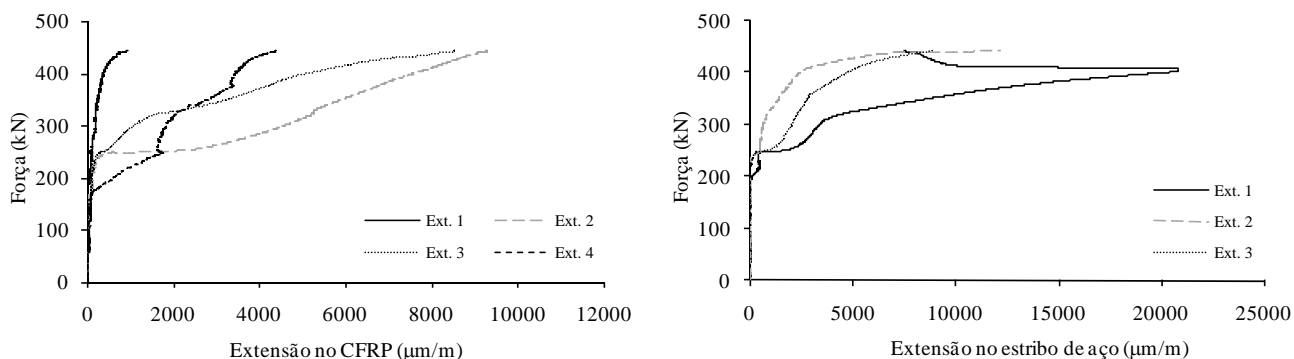


Figura C.48 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 4S-4LI60-B.

2.13 Viga 4S-7LV-B

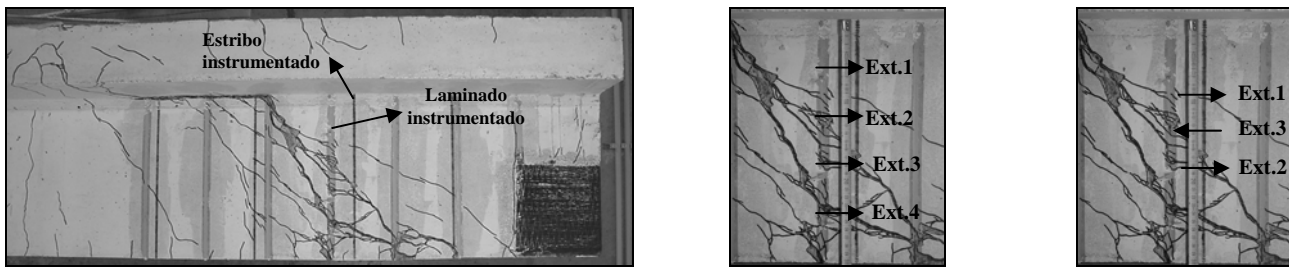


Figura C.49 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-7LV-B.

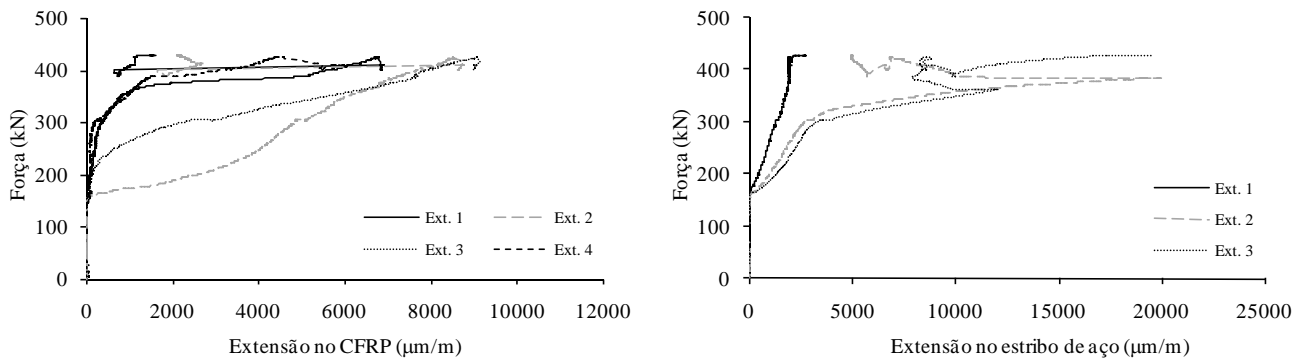


Figura C.50 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 4S-7LV-B.

2.14 Viga 4S-7LI45-B

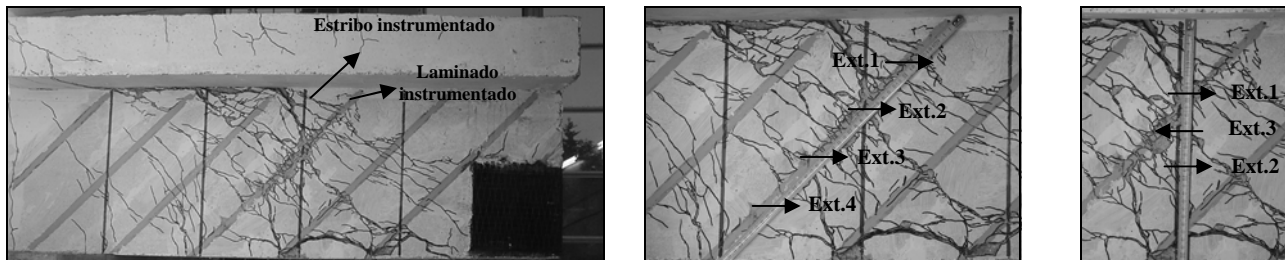


Figura C.51 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-7LI45-B.

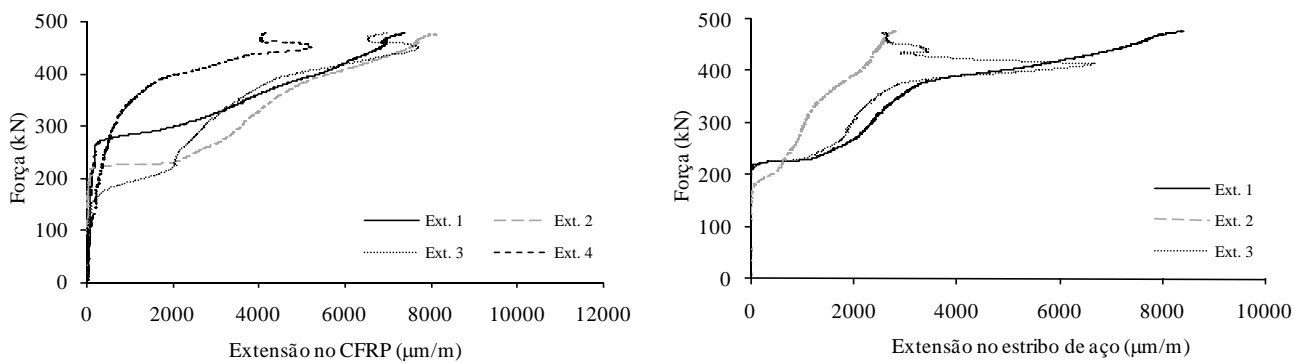


Figura C.52 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 4S-7LI45-B.

2.15 Viga 4S-6LI60-B

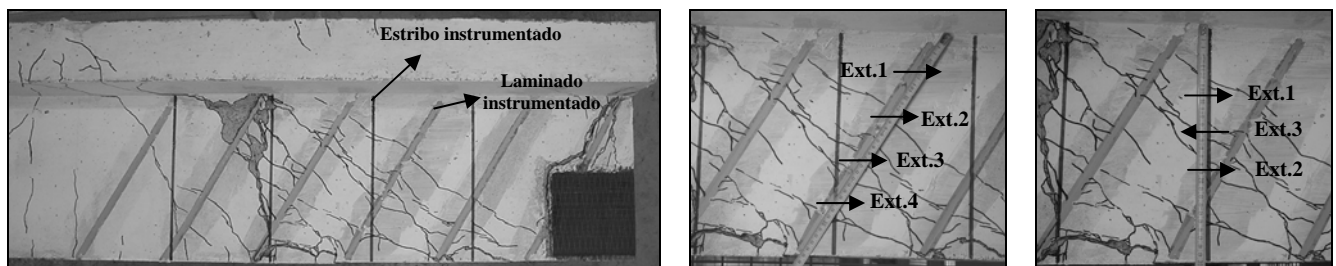


Figura C.53 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-6LI60-B.

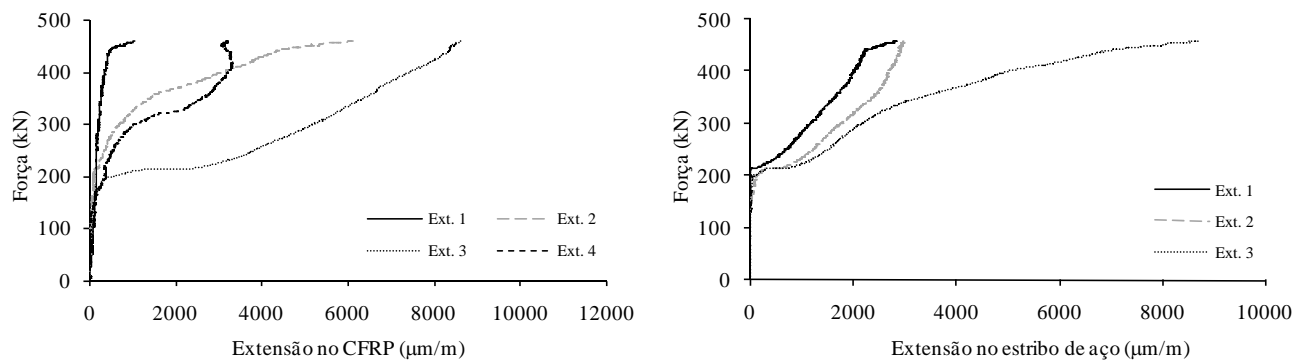


Figura C.54 - Extensões no laminado e estribo instrumentados até à carga máxima da viga 4S-6LI60-B.

3. Vigas da série C

3.1 Viga 2S-4LI45-C

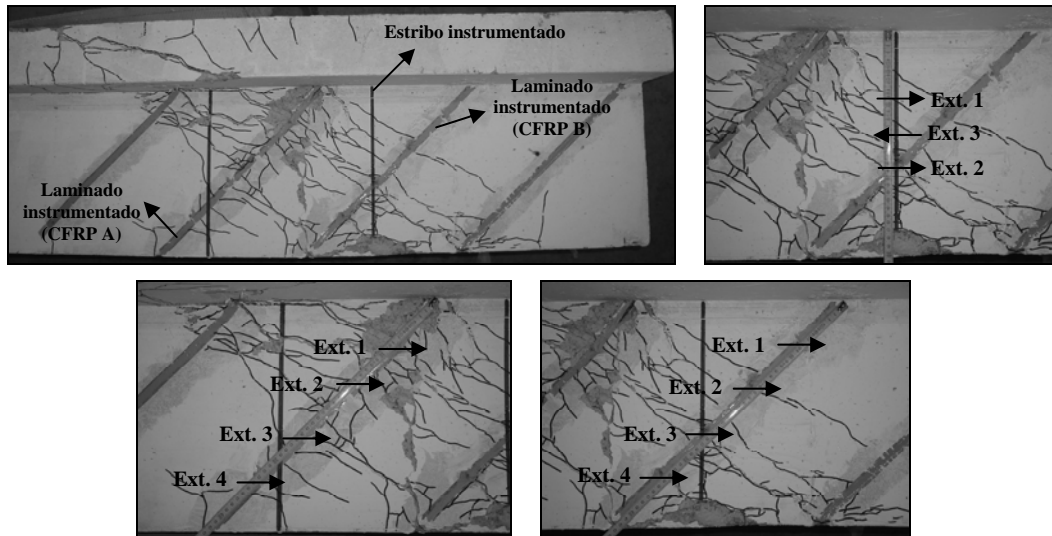


Figura C.55 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-4LI45-C.

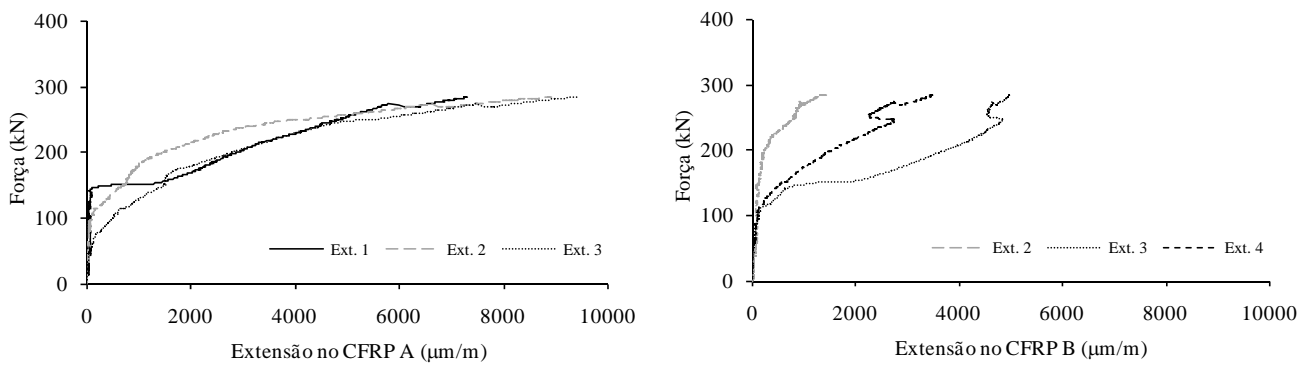


Figura C.56 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-4LI45-C.

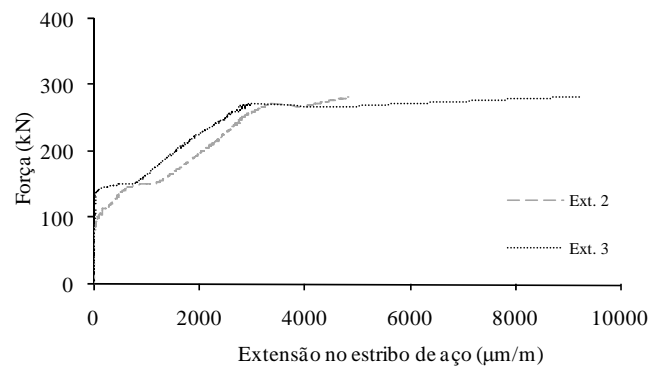


Figura C.57 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-4LI45-C.

3.2 Viga 2S-4LI60-C

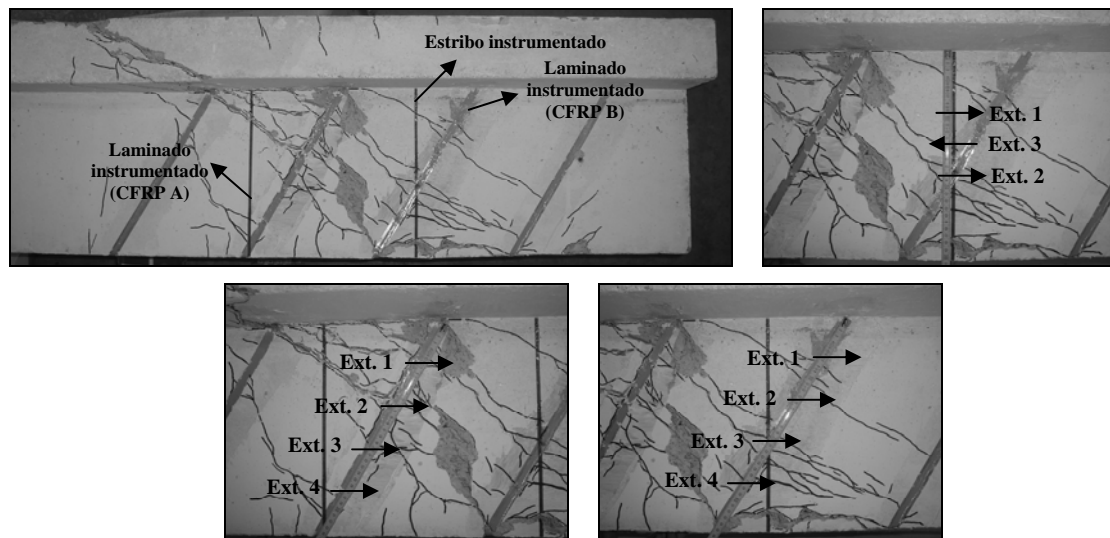


Figura C.58 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-4LI60-C.

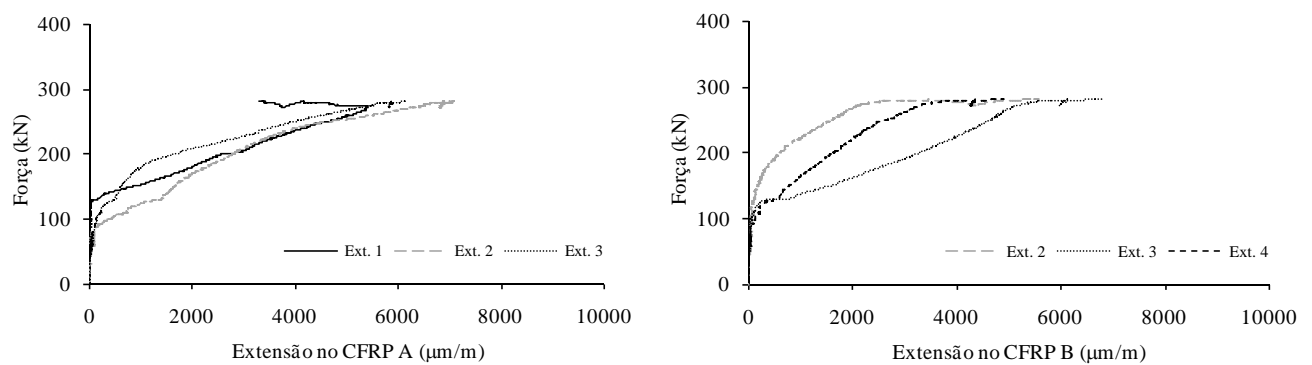


Figura C.59 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-4LI60-C.

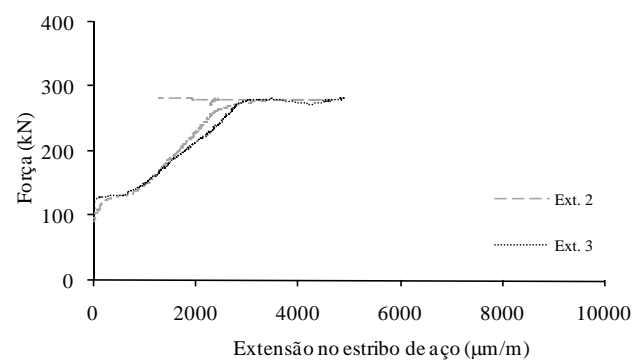


Figura C.60 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-4LI60-C.

3.3 Viga 2S-7LV-C

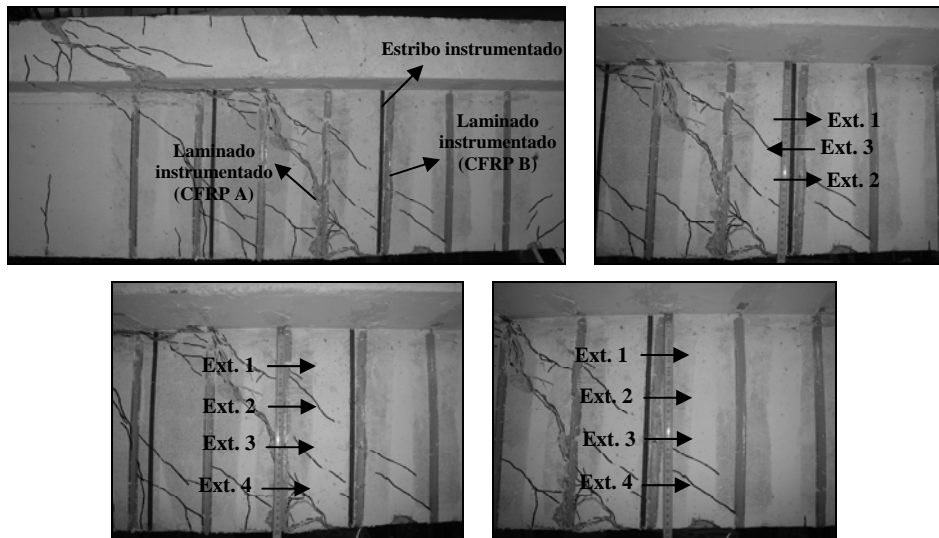


Figura C.61 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-7LV-C.

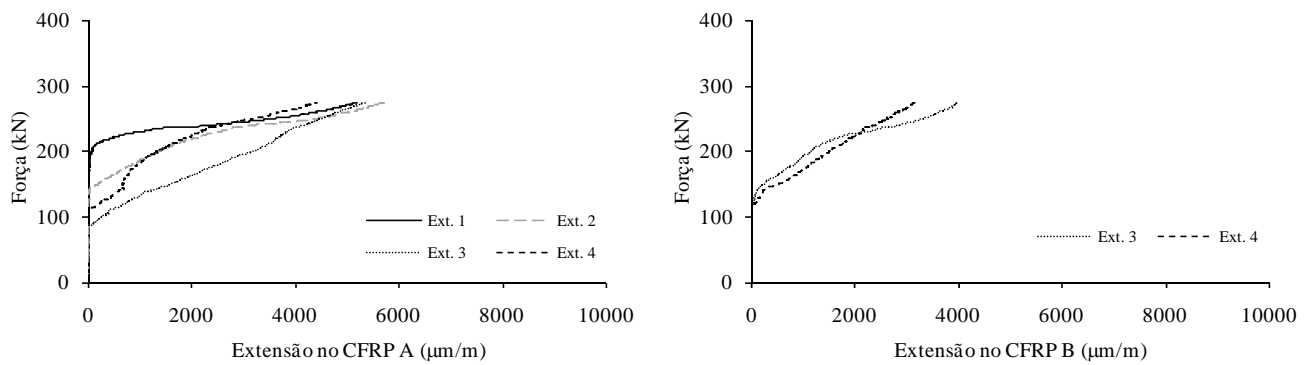


Figura C.62 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-7LV-C.

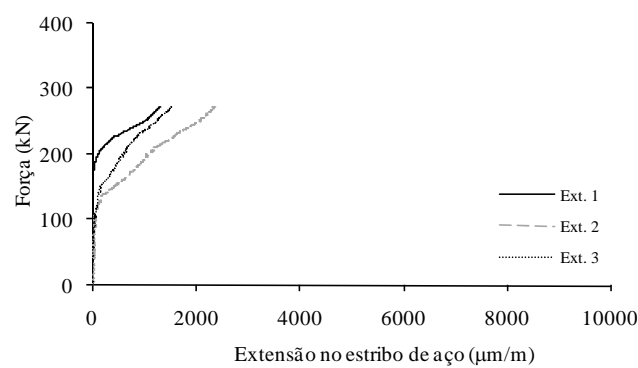


Figura C.63 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-7LV-C.

3.4 Viga 2S-7LI45-C

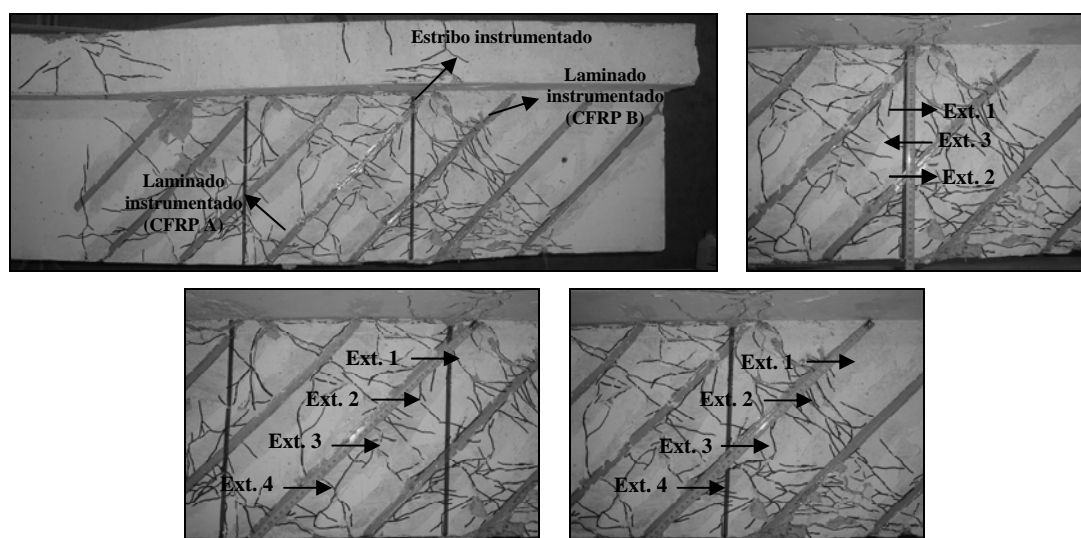


Figura C.64 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-7LI45-C.

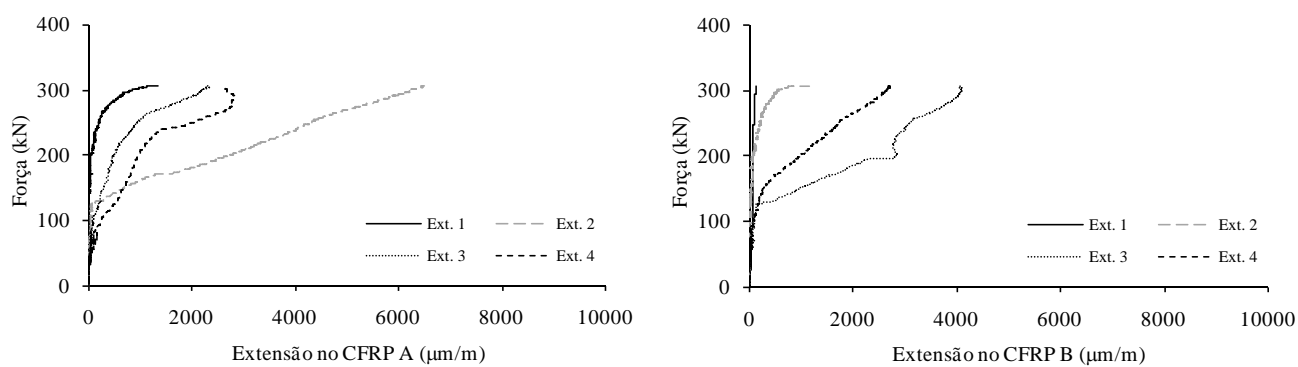


Figura C.65 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-7LI45-C.

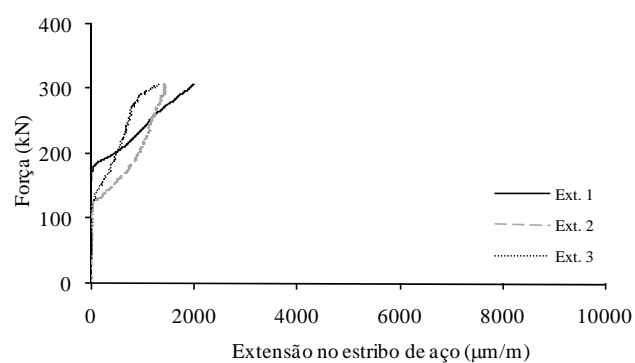


Figura C.66 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-7LI45-C.

3.5 Viga 2S-6LI60-C

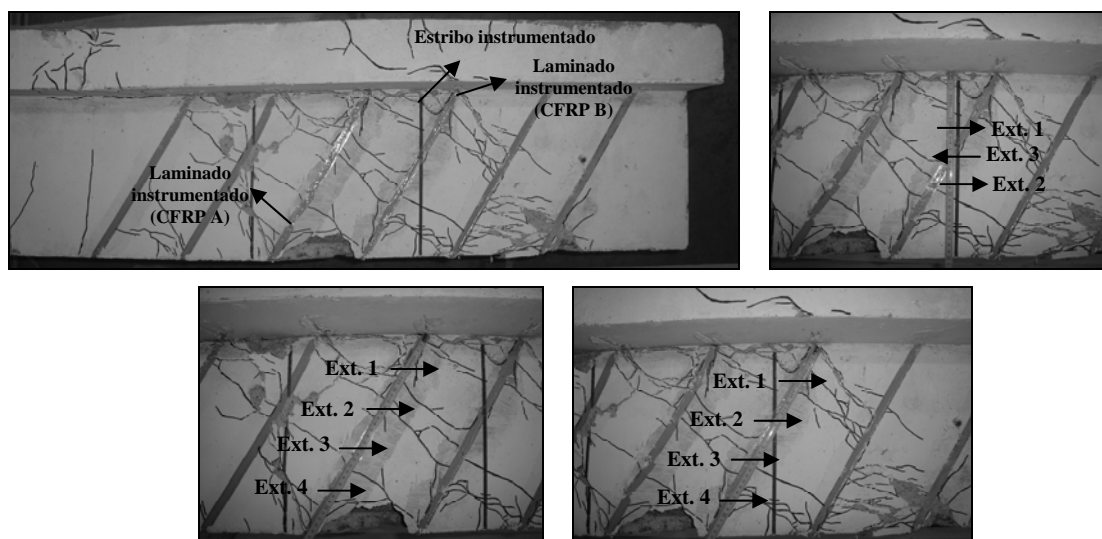


Figura C.67 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 2S-6LI60-C.

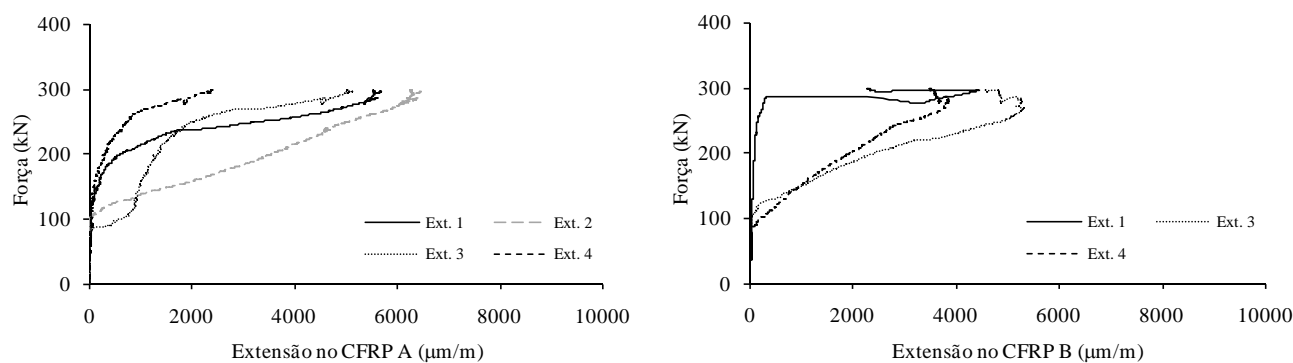


Figura C.68 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 2S-6LI60-C.

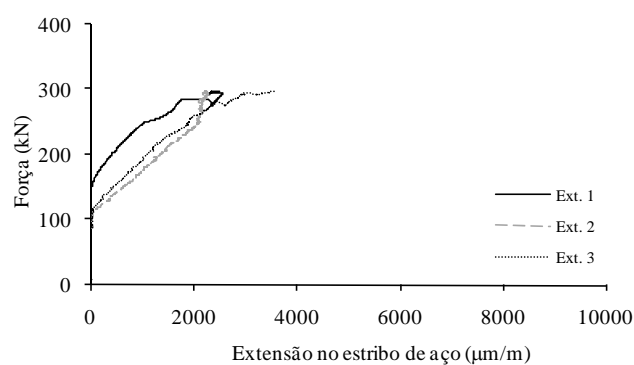


Figura C.69 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 2S-6LI60-C.

3.6 Viga 4S-4LI60-C

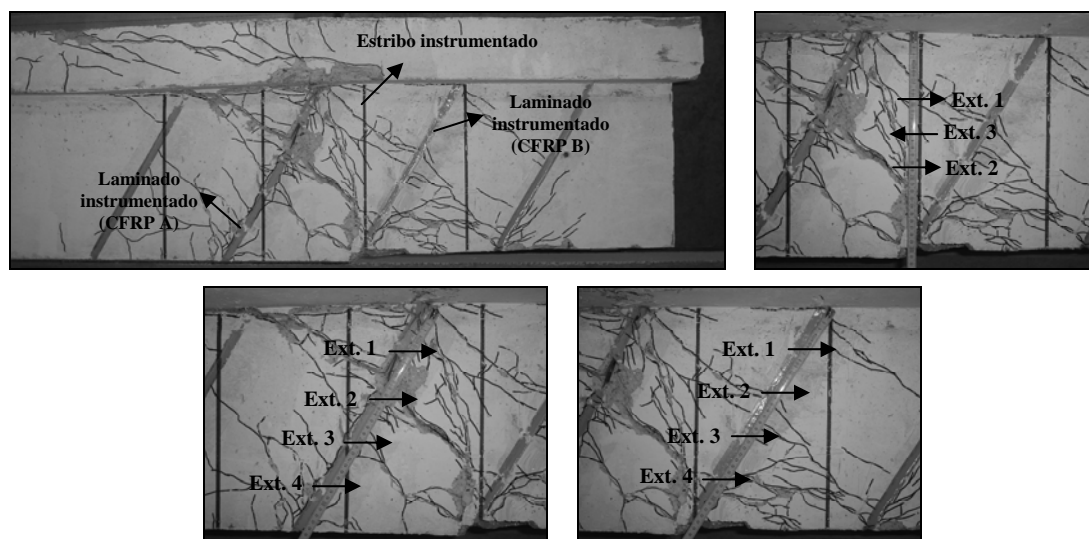


Figura C.70 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-4LI60-C.

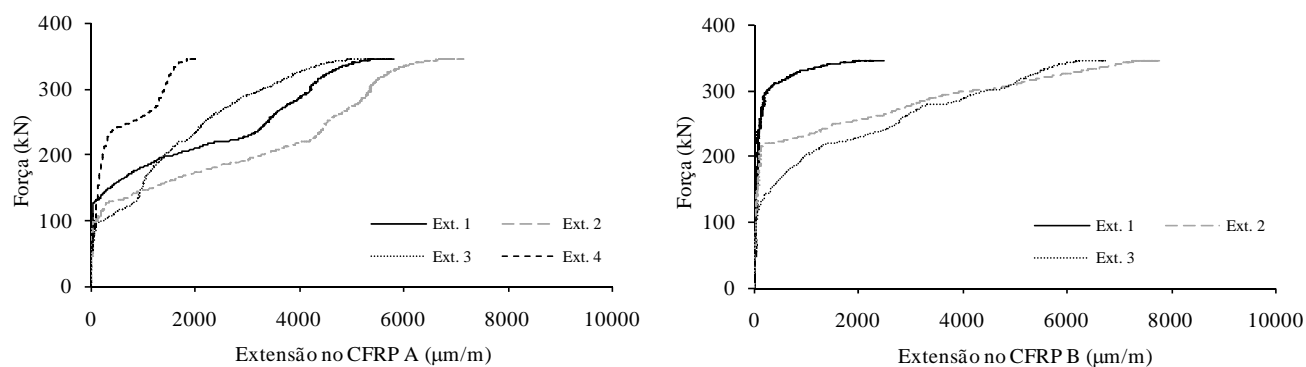


Figura C.71 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 4S-4LI60-C.

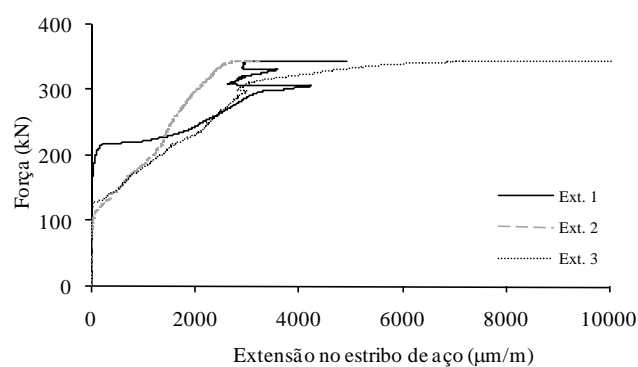


Figura C.72 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 4S-4LI60-C.

3.7 Viga 4S-7LV-C

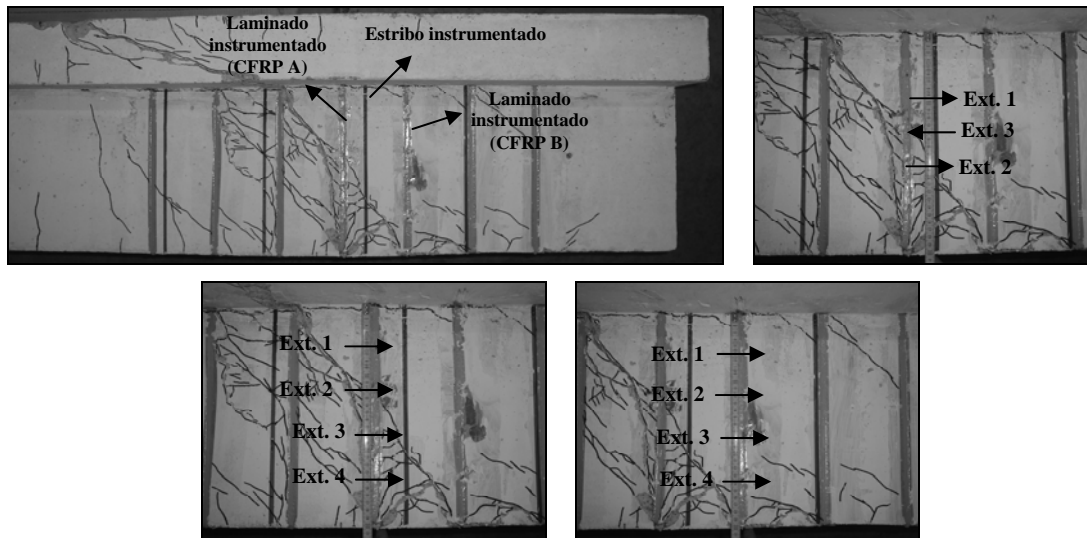


Figura C.73 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-7LV-C.

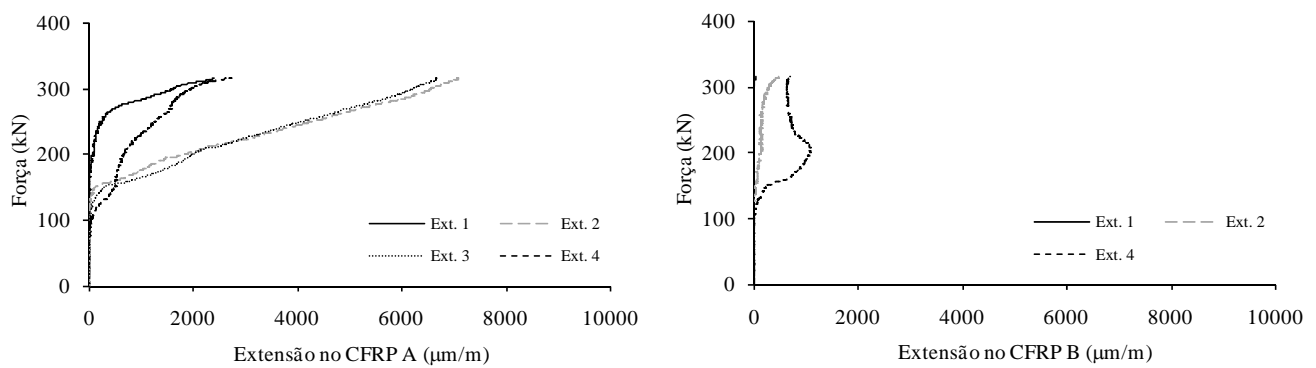


Figura C.74 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 4S-7LV-C.

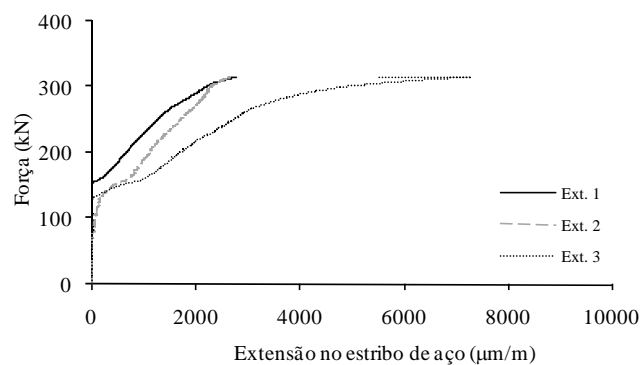


Figura C.75 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 4S-7LV-C.

3.8 Viga 4S-7LI45-C

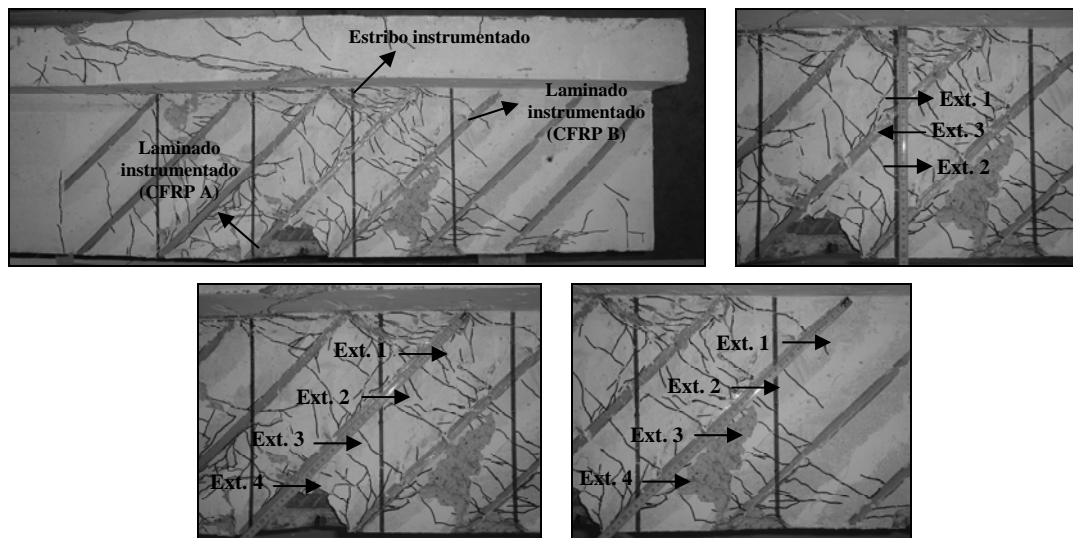


Figura C.76 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-7LI45-C.

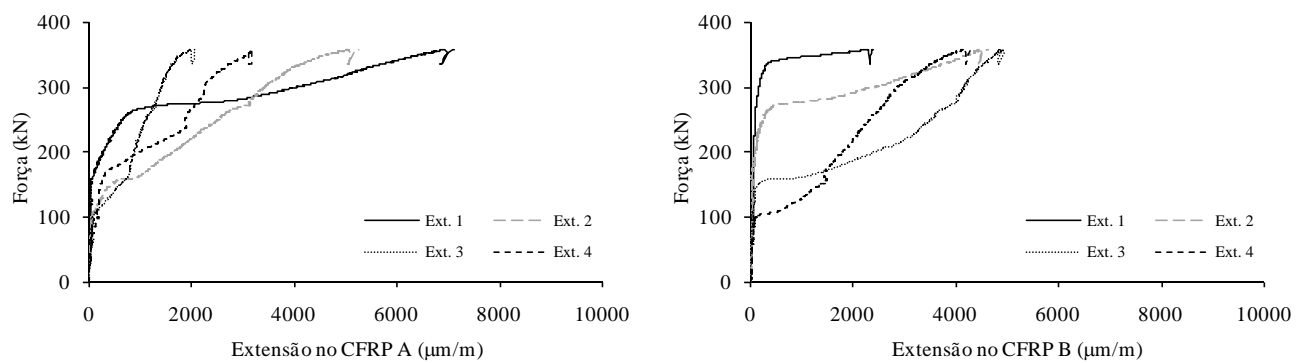


Figura C.77 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 4S-7LI45-C.

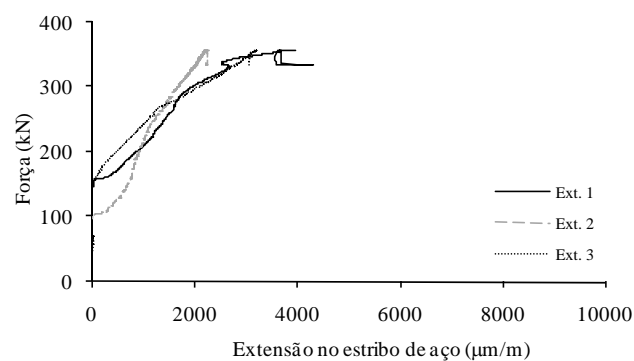


Figura C.78 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 4S-7LI45-C.

3.9 Viga 4S-6LI60-C

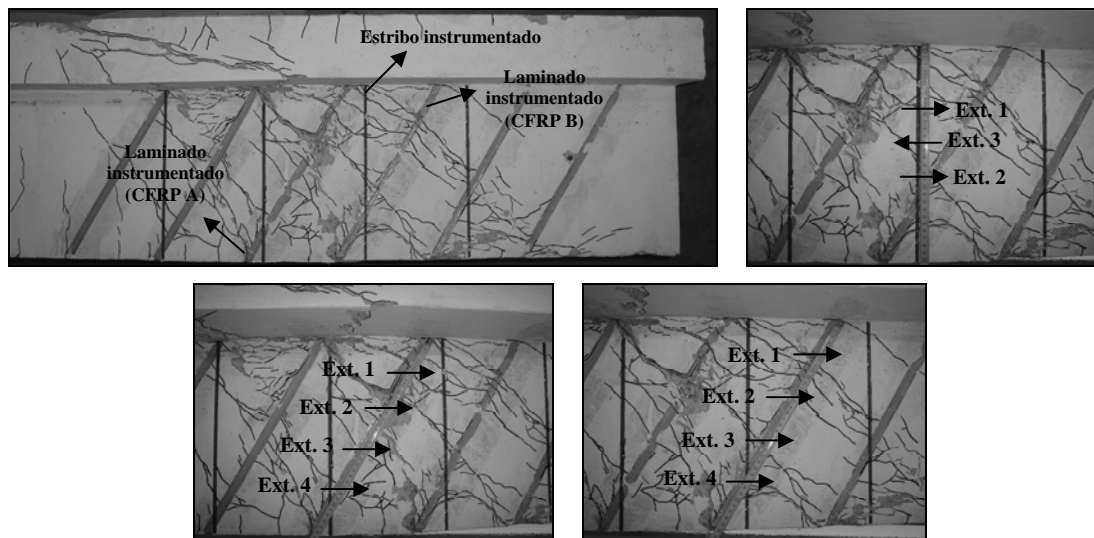


Figura C.79 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 4S-6LI60-C.

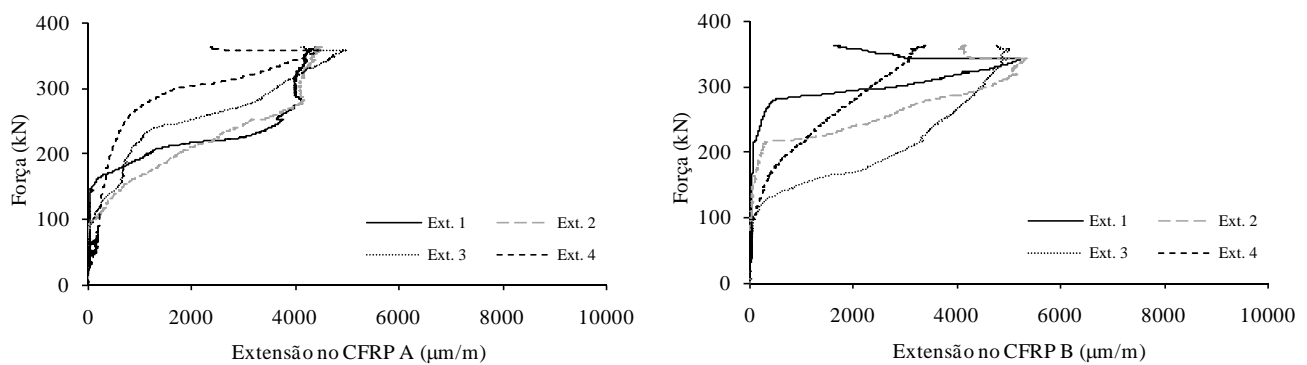


Figura C.80 - Extensões nos laminados instrumentados até à carga máxima da viga 4S-6LI60-C.

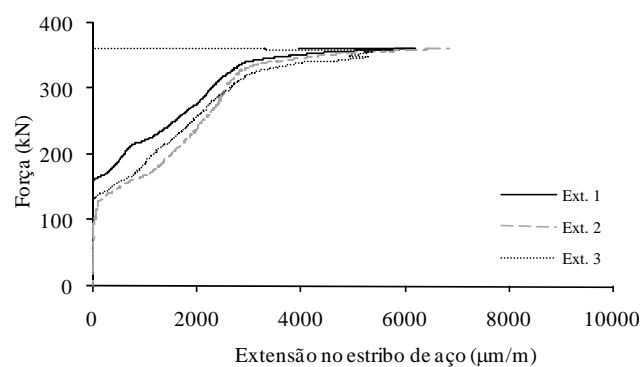


Figura C.81 - Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima da viga 4S-6LI60-C.

4. Vigas da série D

4.1 Viga 3S-6LV-D

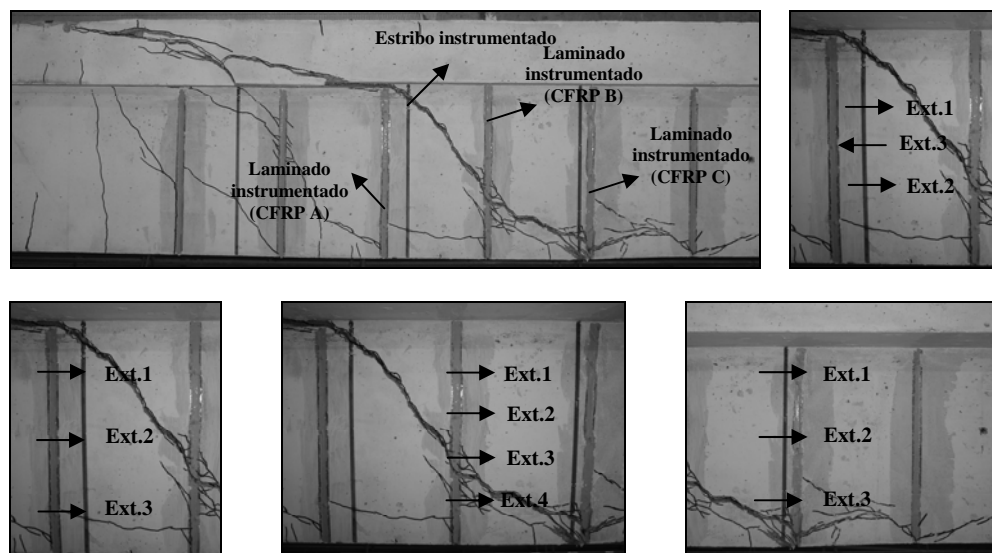


Figura C.82 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 3S-6LV-D.

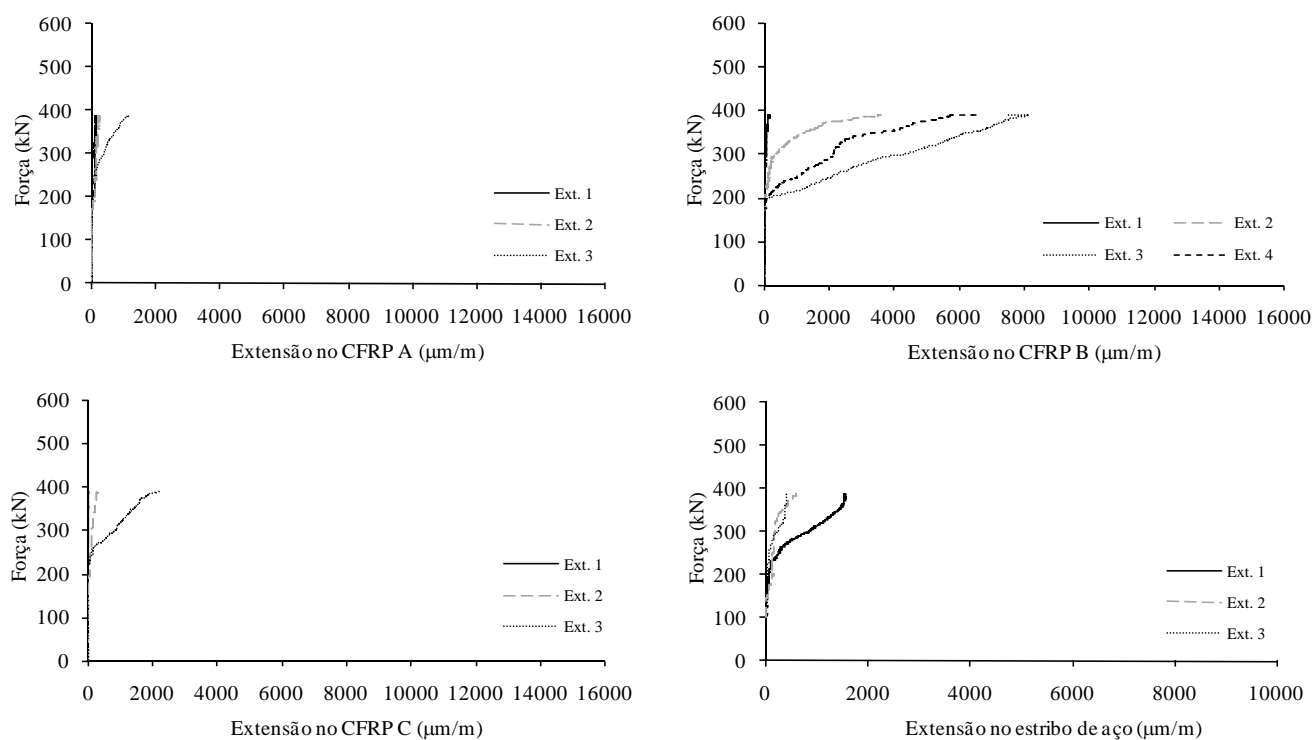


Figura C.83 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-6LV-D.

4.2 Viga 3S-5LI45-D

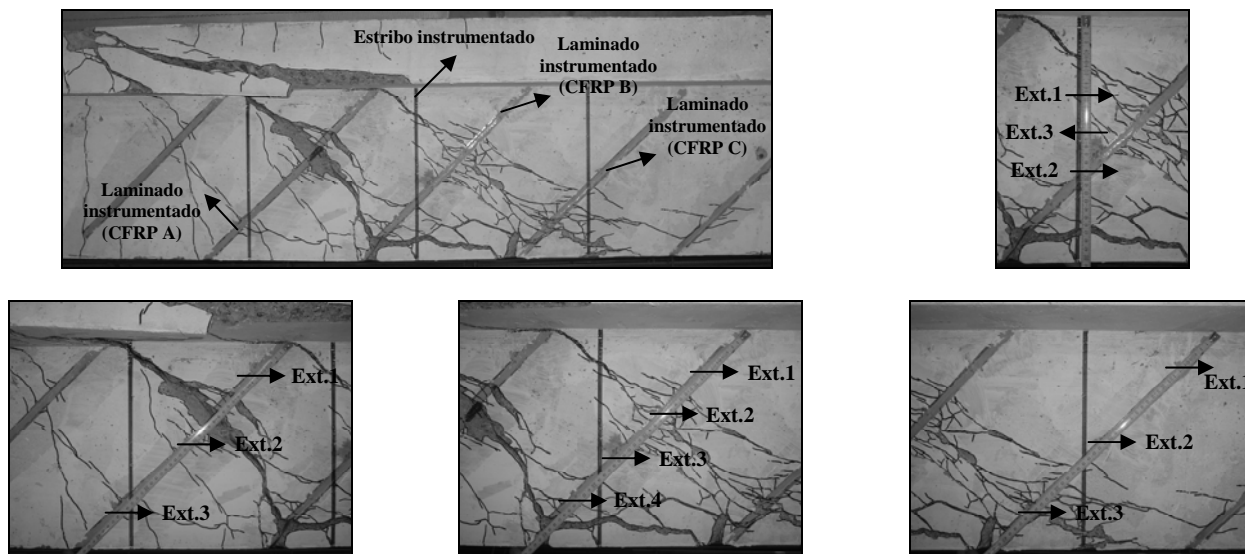


Figura C.84 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 3S-5LI45-D.

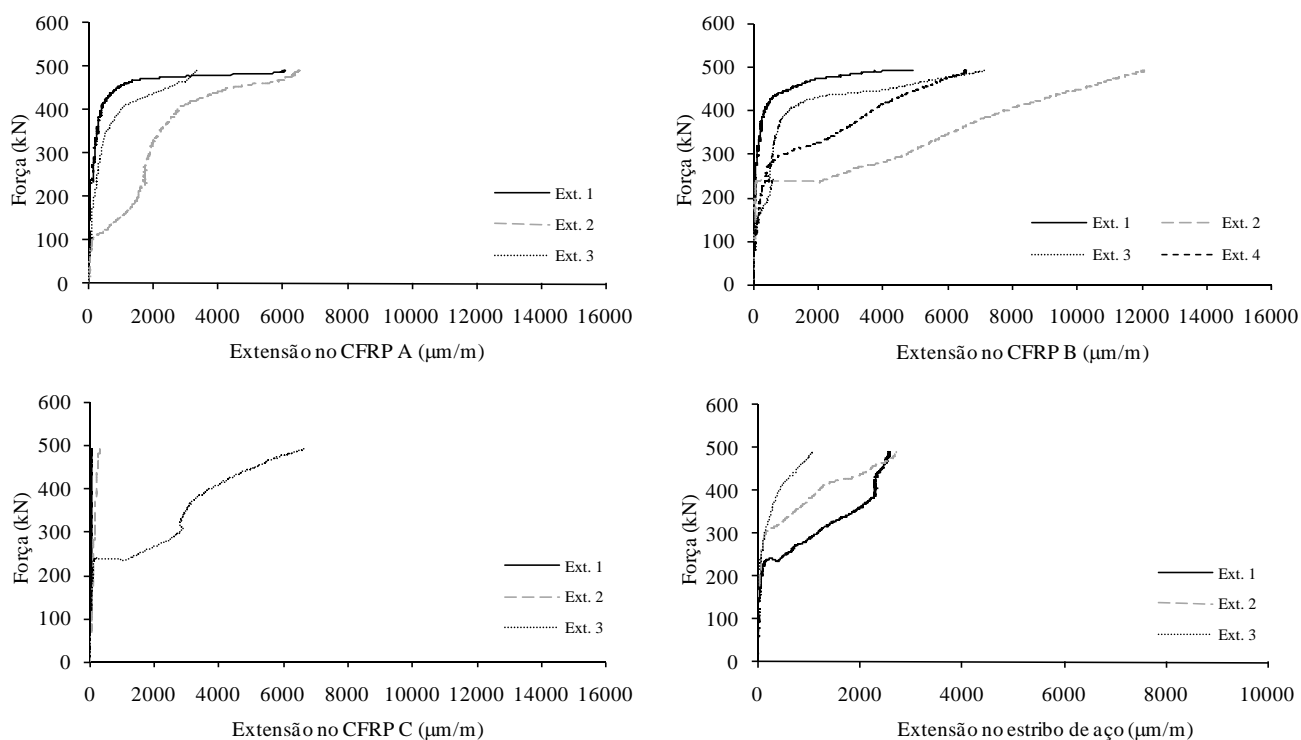


Figura C.85 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-5LI45-D.

4.3 Viga 3S-10LV-D

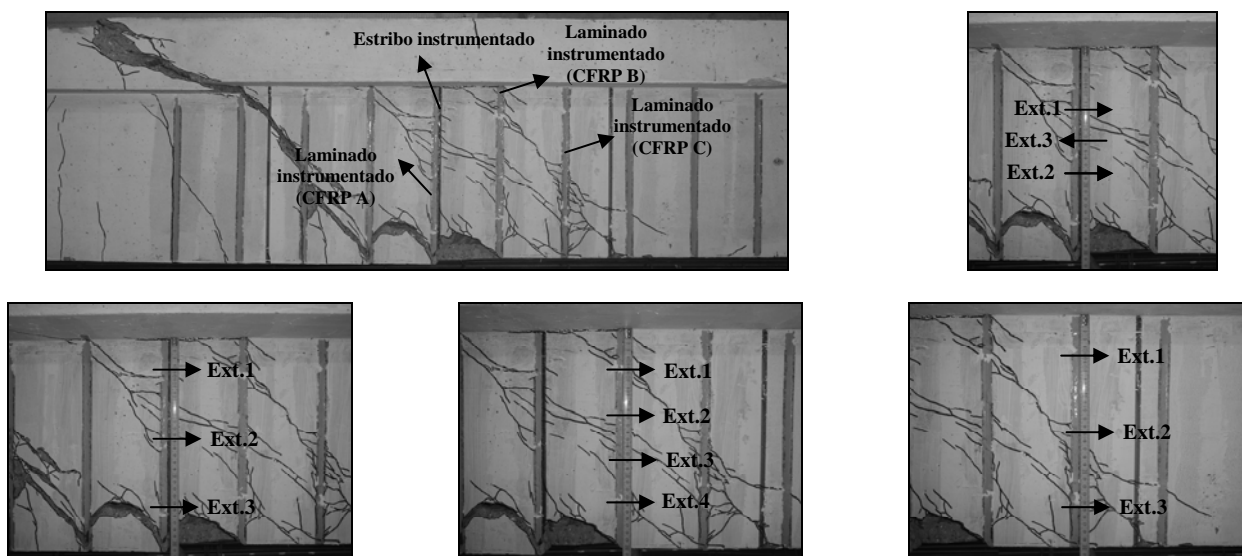


Figura C.86 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 3S-10LV-D.

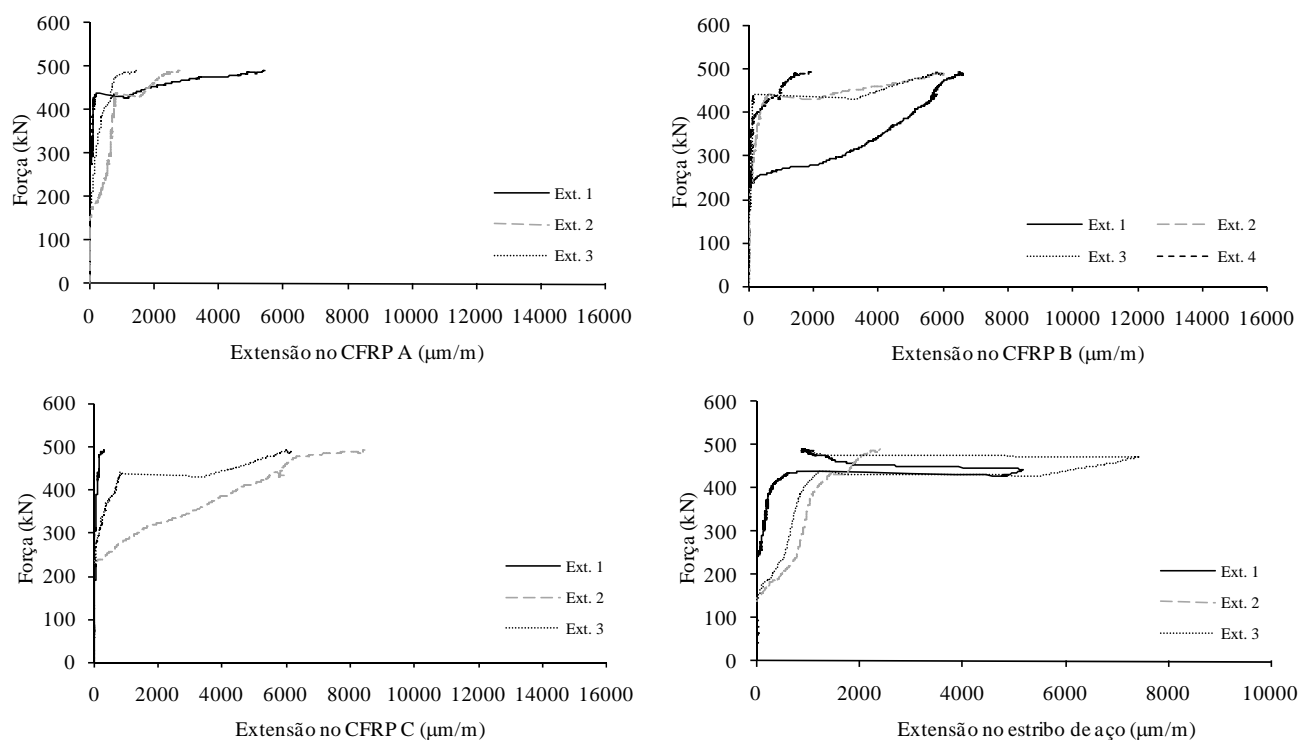


Figura C.87 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-10LV-D.

4.4 Viga 3S-9LI45-D

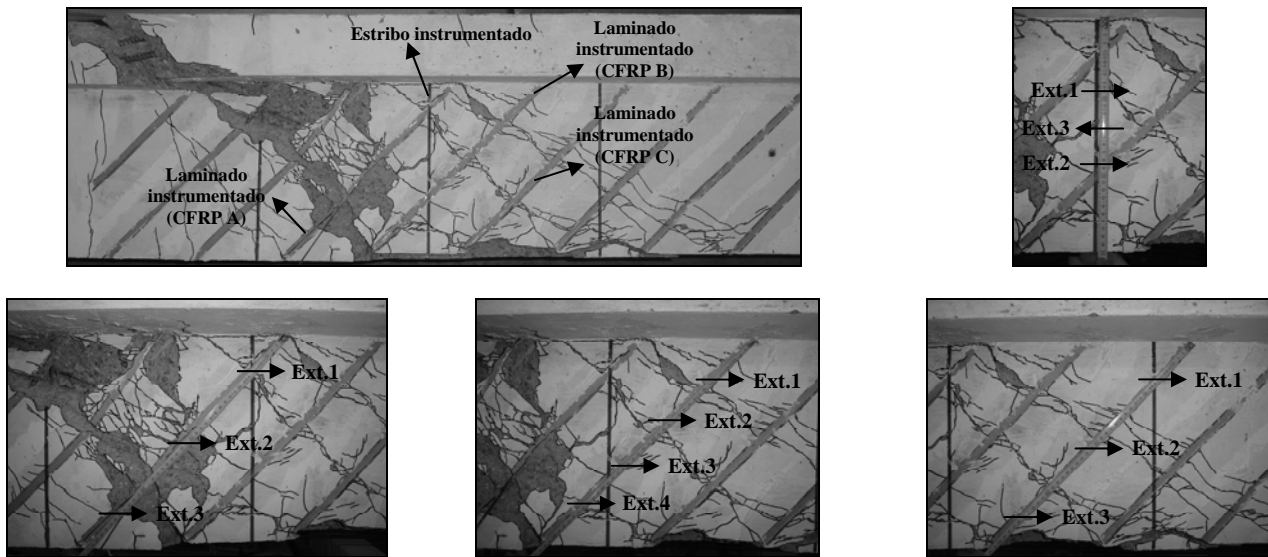


Figura C.88 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 3S-9LI45-D.

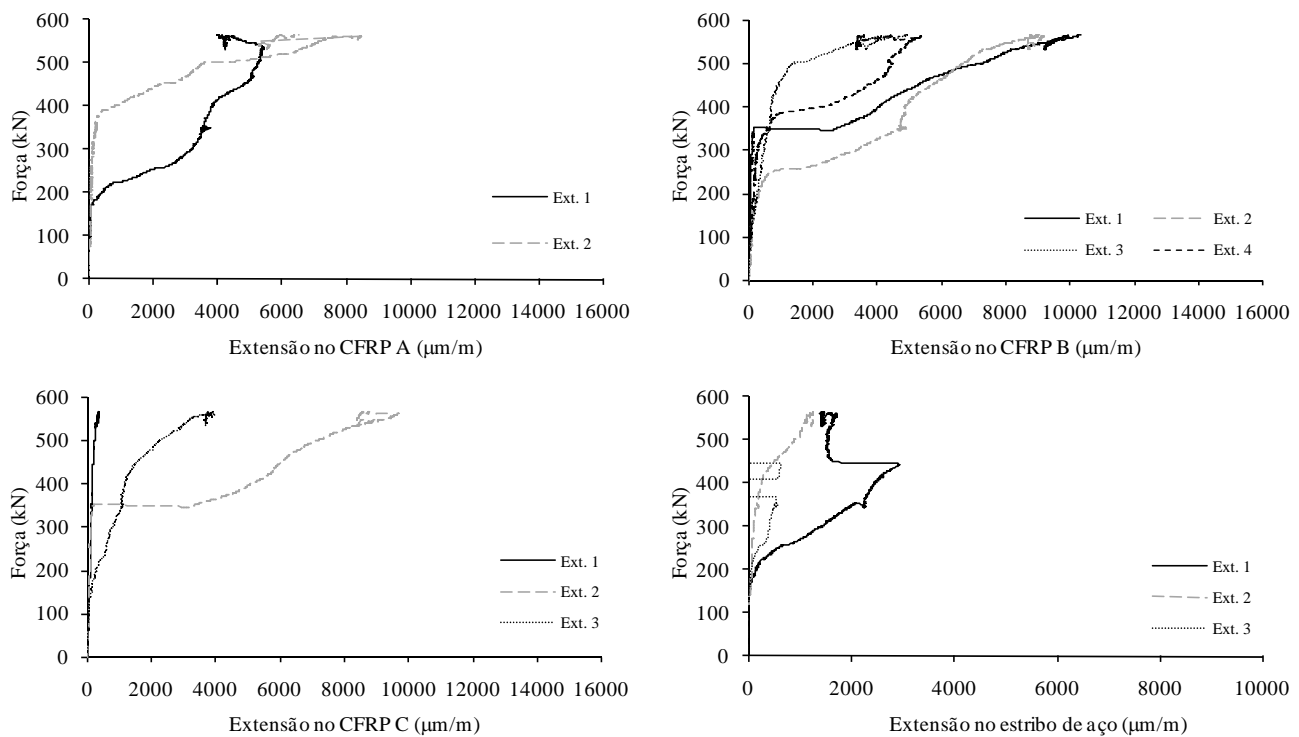


Figura C.89 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-9LI45-D.

4.5 Viga 3S-8LI60-D

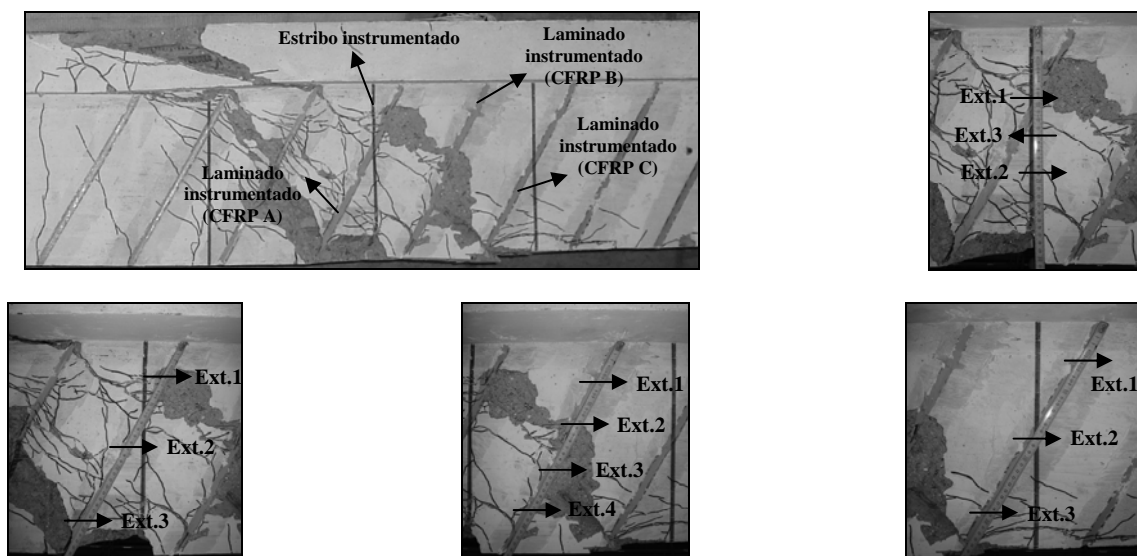


Figura C.90 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 3S-8LI60-D.

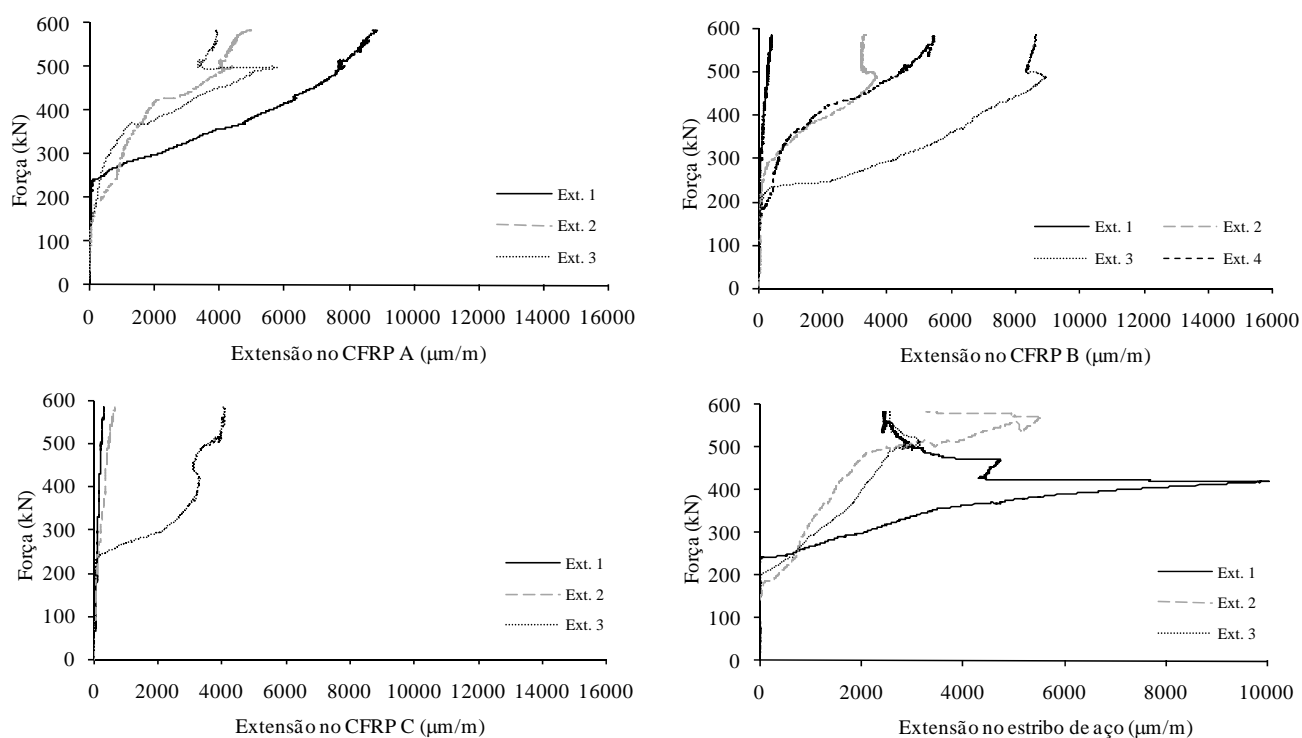


Figura C.91 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-8LI60-D.

4.6 Viga 5S-5LI45-D

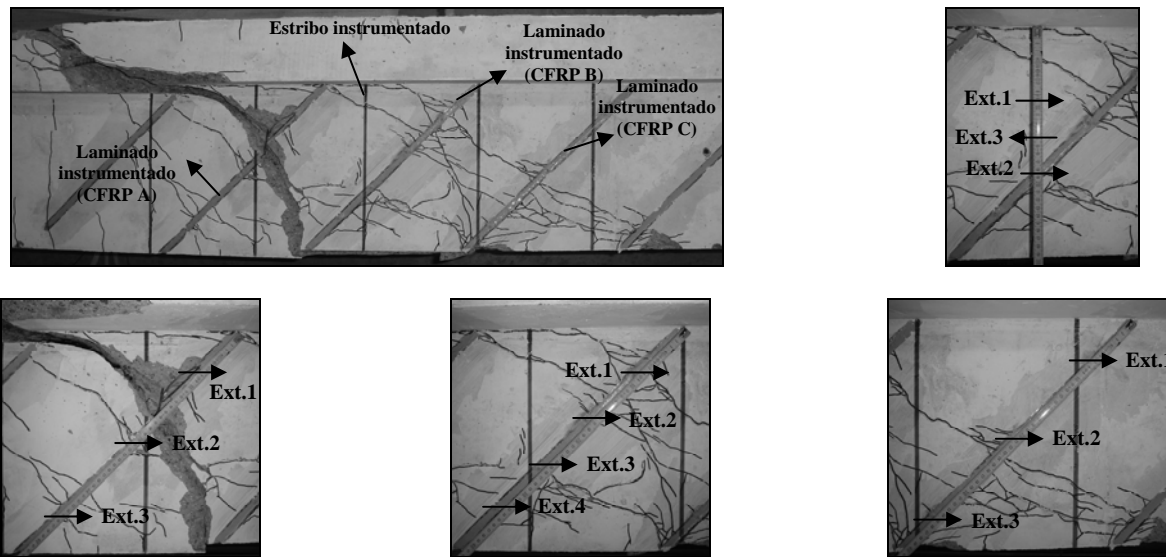


Figura C.92 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 5S-5LI45-D.

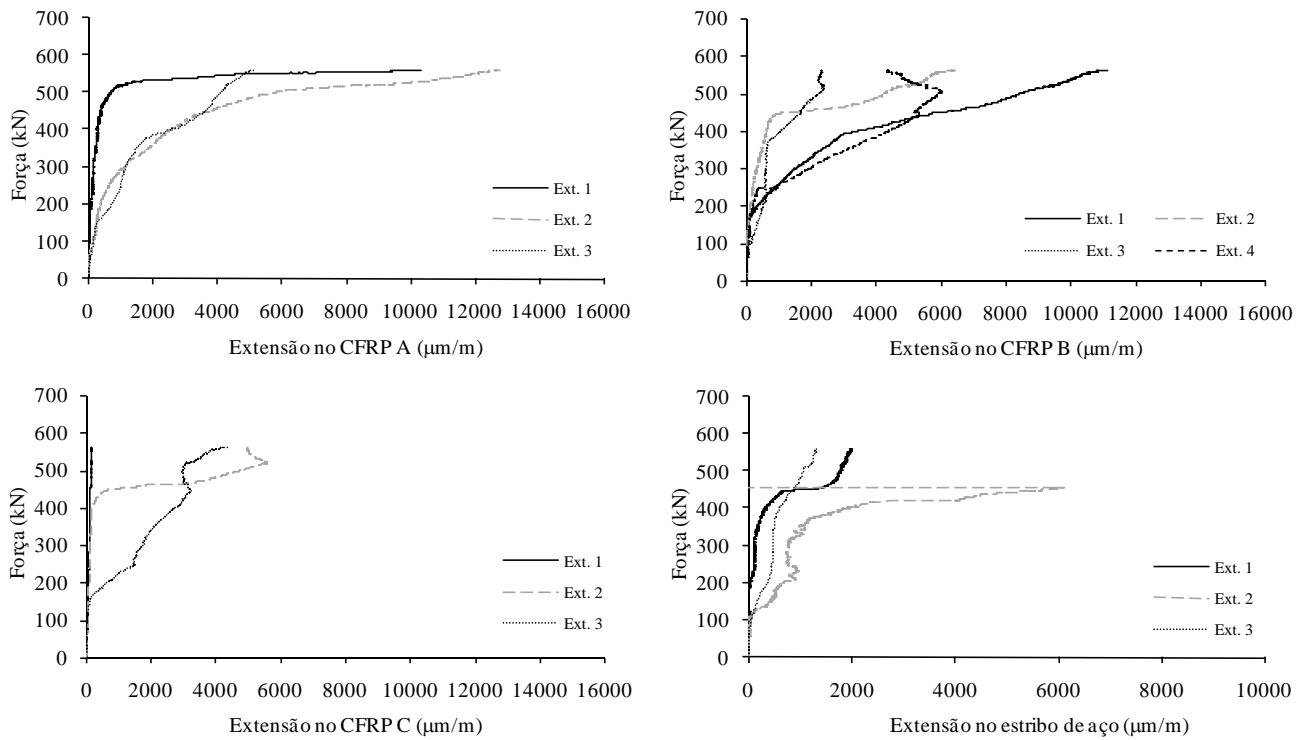


Figura C.93 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 5S-5LI45-D.

4.7 Viga 5S-5LI60-D

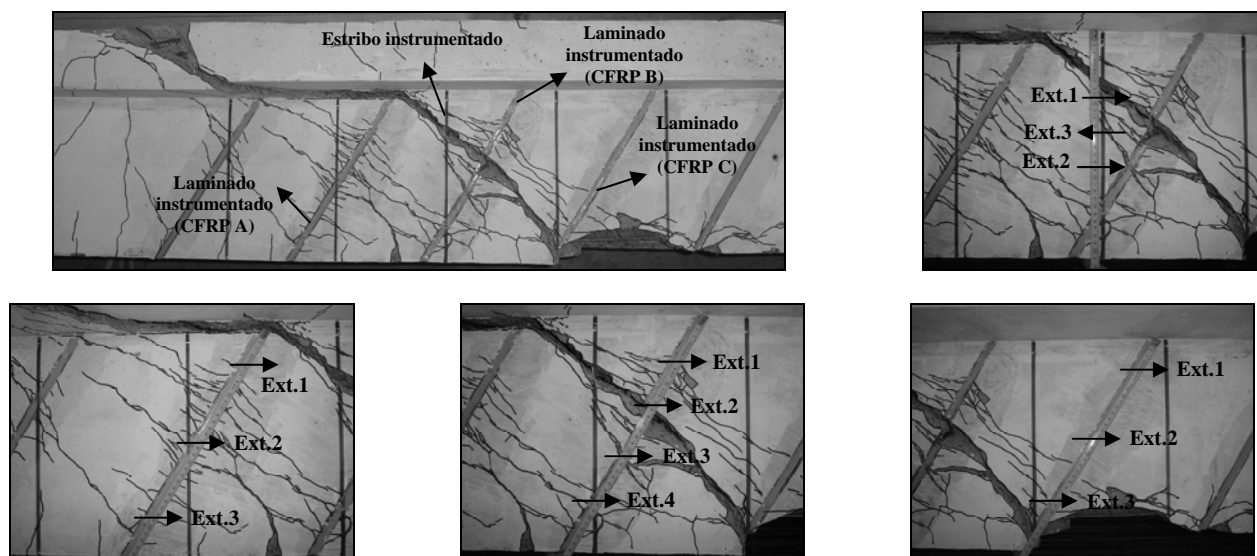


Figura C.94 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 5S-5LI60-D.

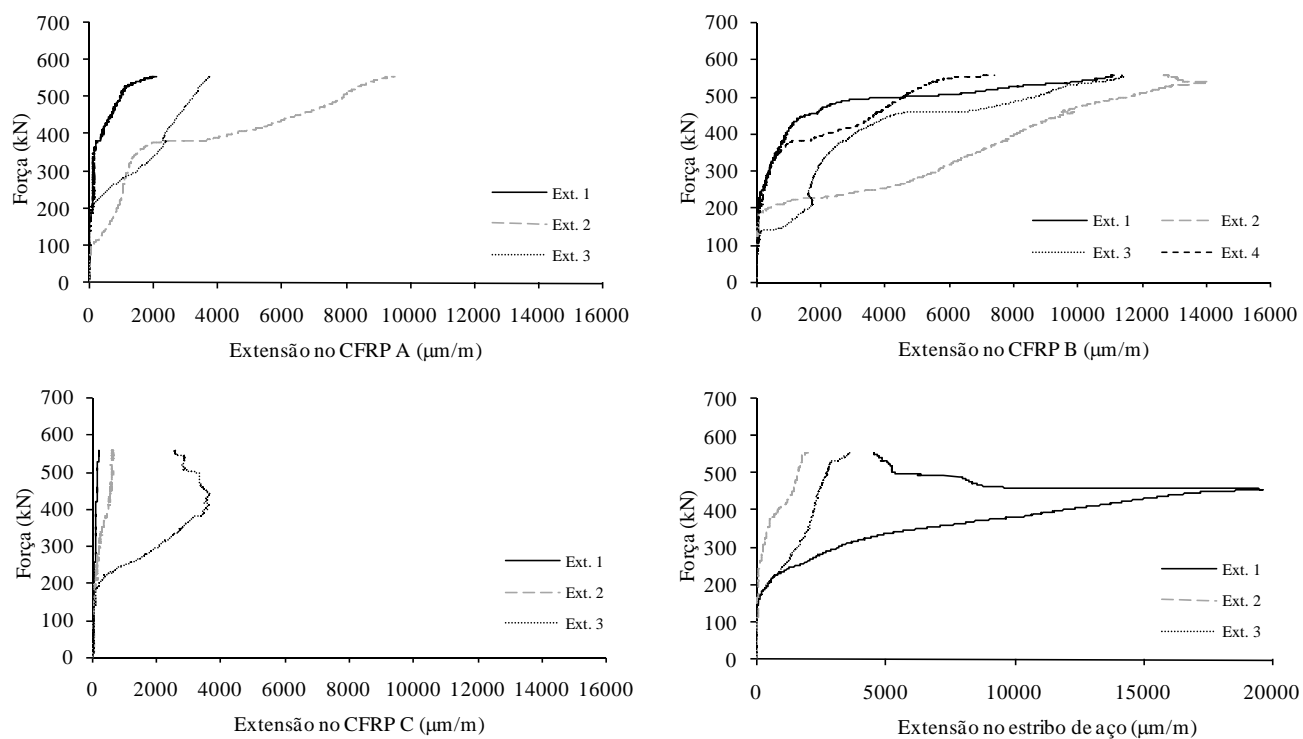


Figura C.95 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 5S-5LI60-D.

4.8 Viga 5S-9LI45-D

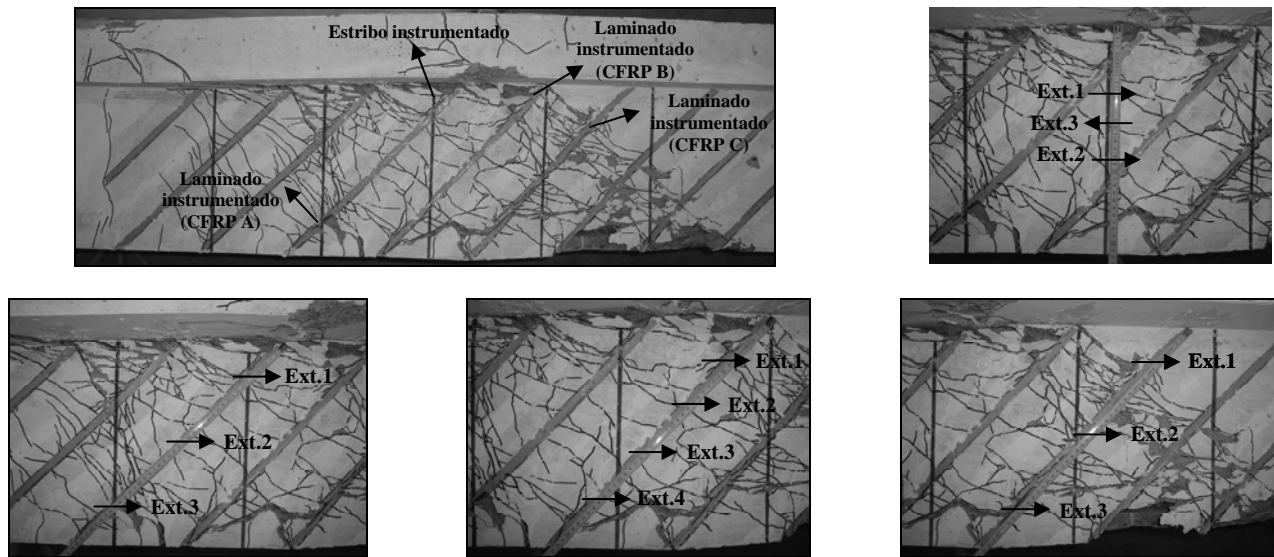


Figura C.96 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 5S-9LI45-D.

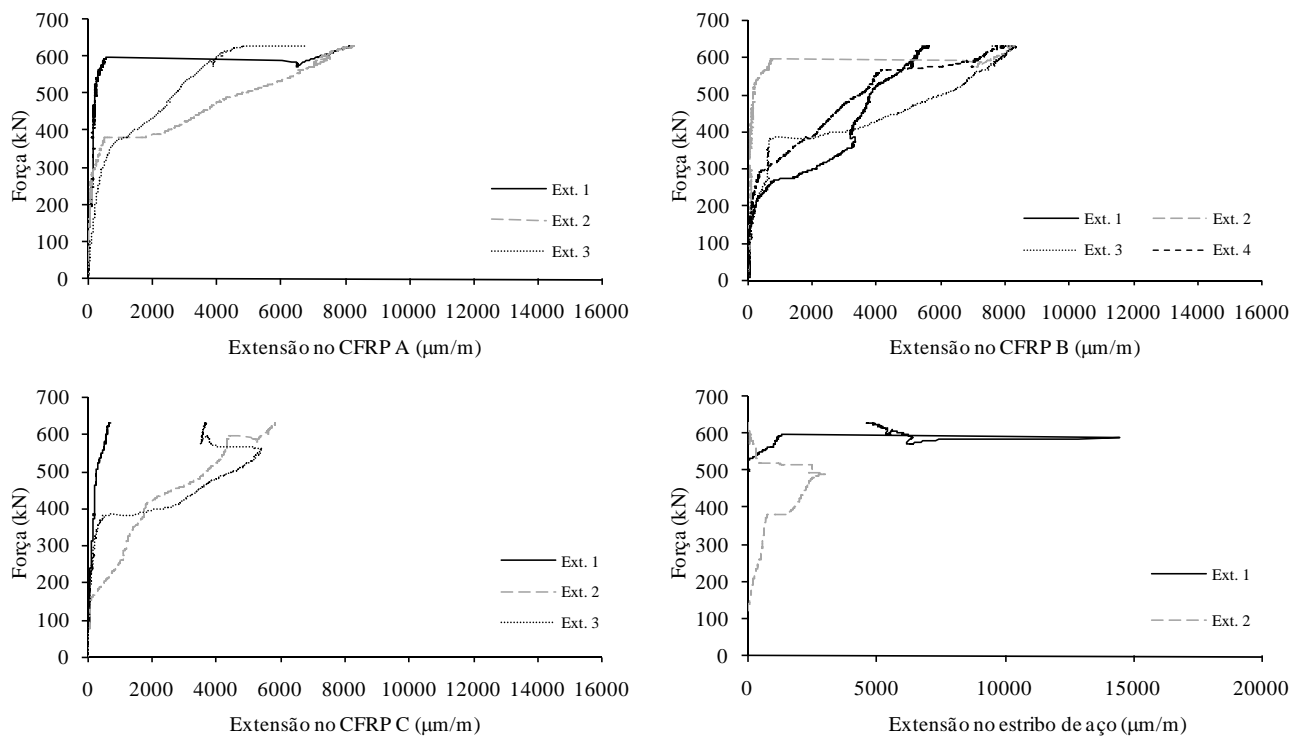


Figura C.97 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 5S-9LI45-D.

4.9 Viga 5S-8LI60-D

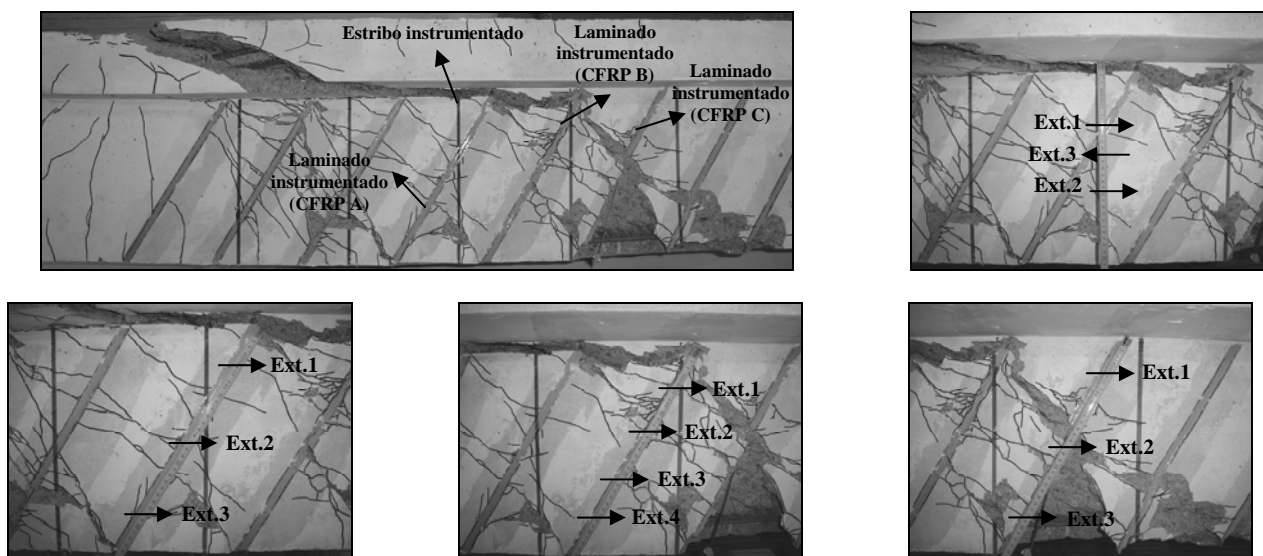


Figura C.98 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 5S-8LI60-D.

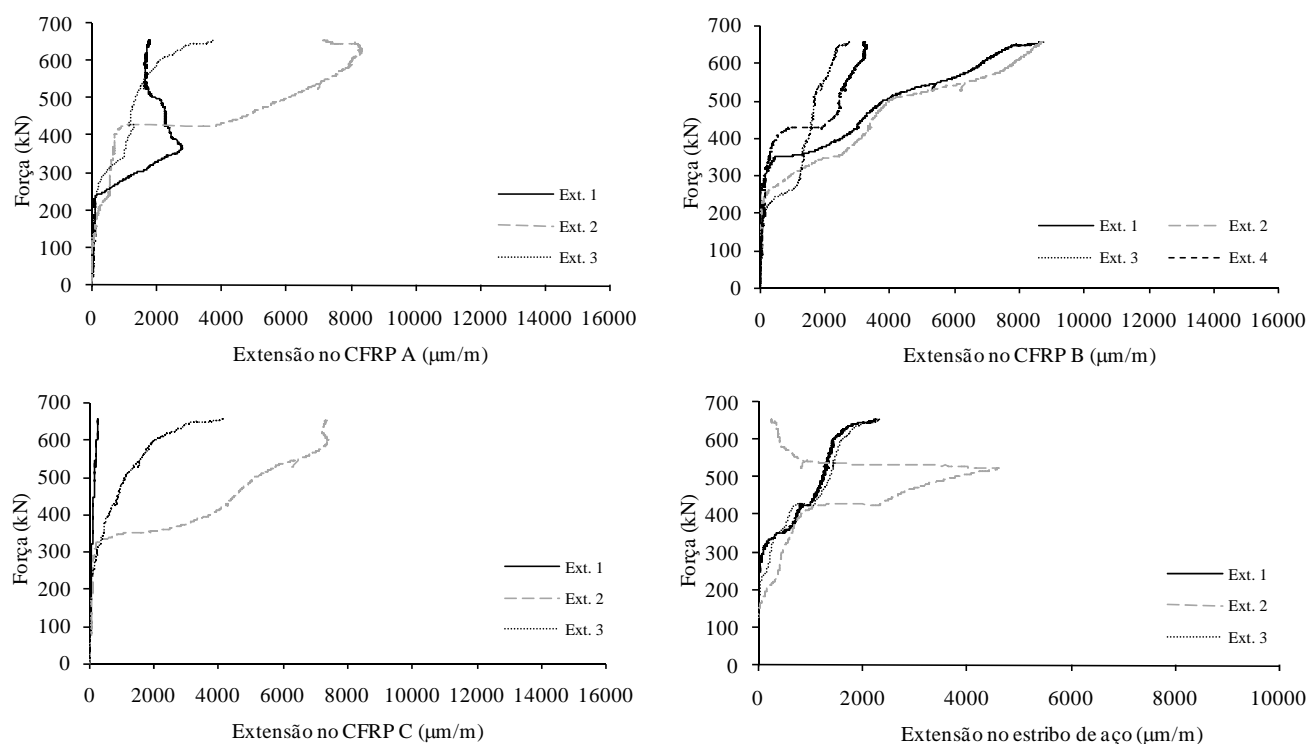


Figura C.99 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 5S-8LI60-D.

4.10 Viga 3S-5LI45F1-D

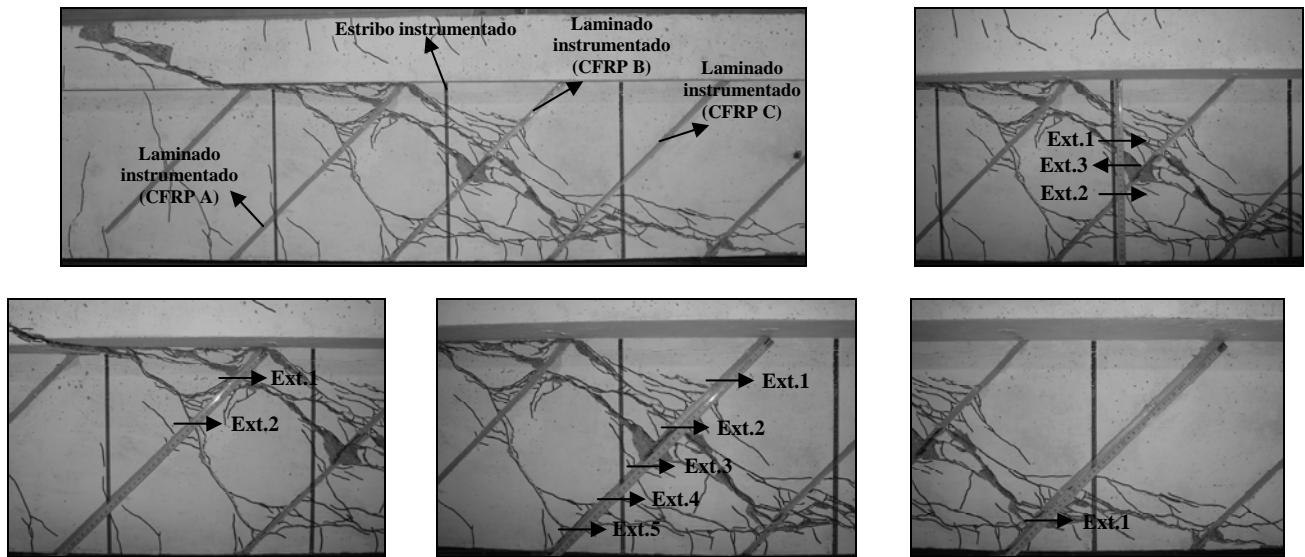


Figura C.100 - Localização dos extensómetros no laminado e estribo instrumentados da viga 3S-5LI45F1-D.

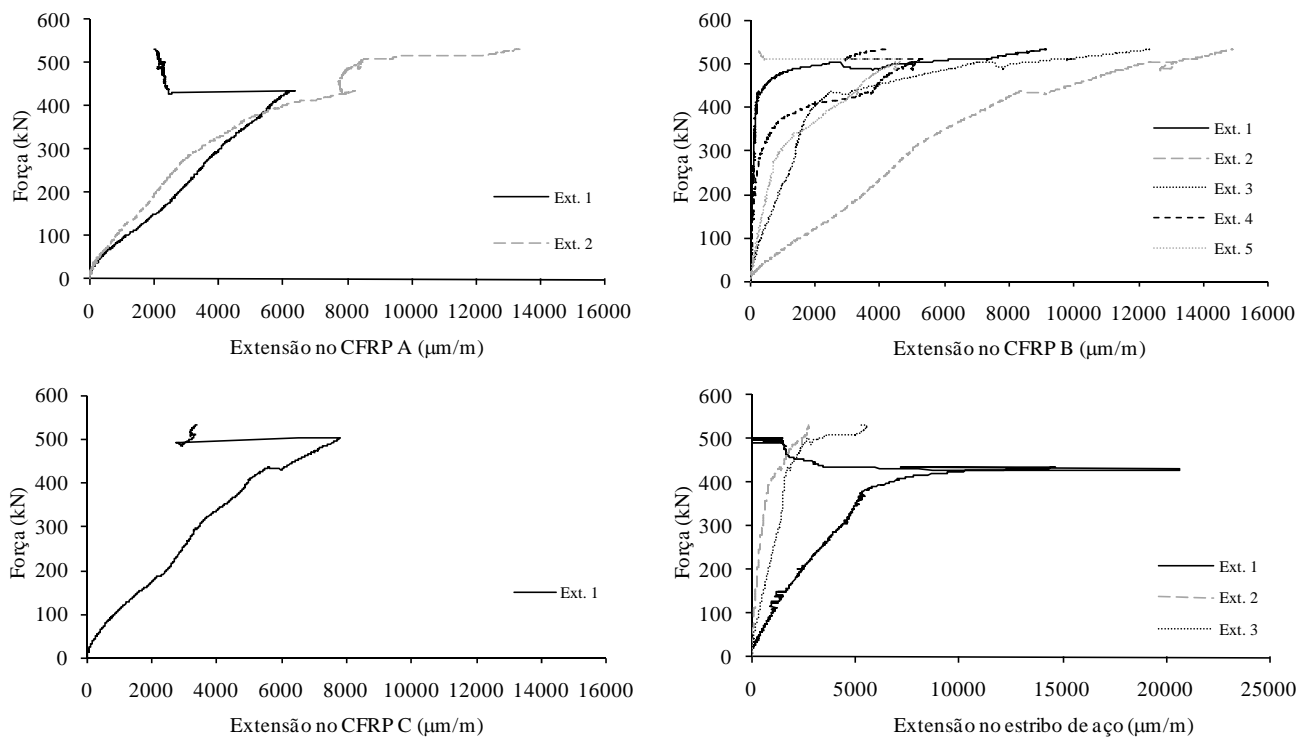


Figura C.101 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-5LI45F1-D.

4.11 Viga 3S-5LI45F2-D

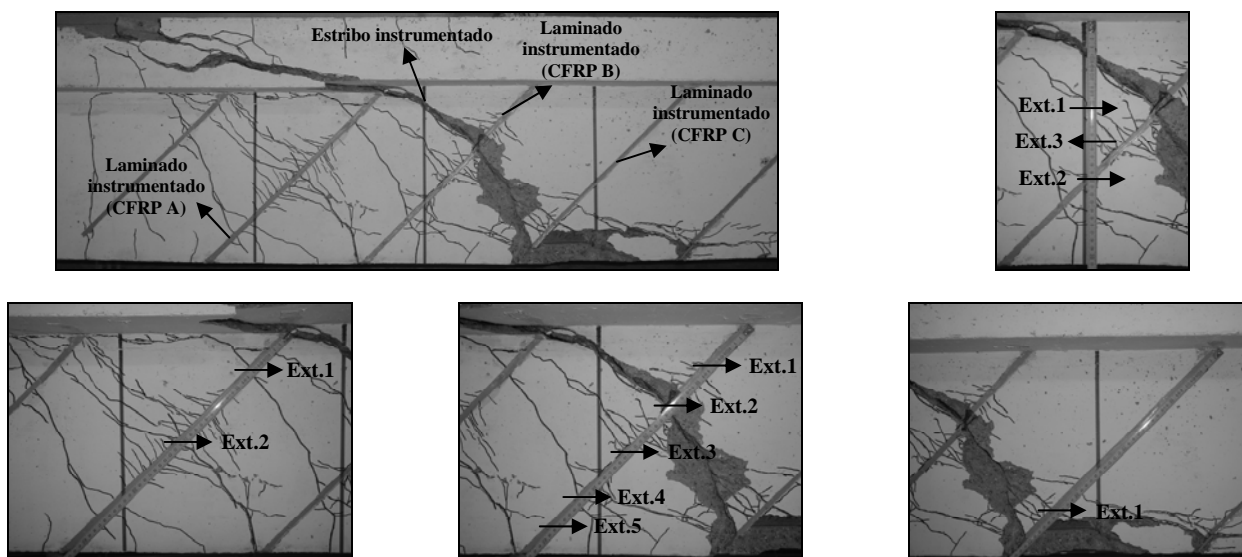


Figura C.102 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 3S-5LI45F2-D.

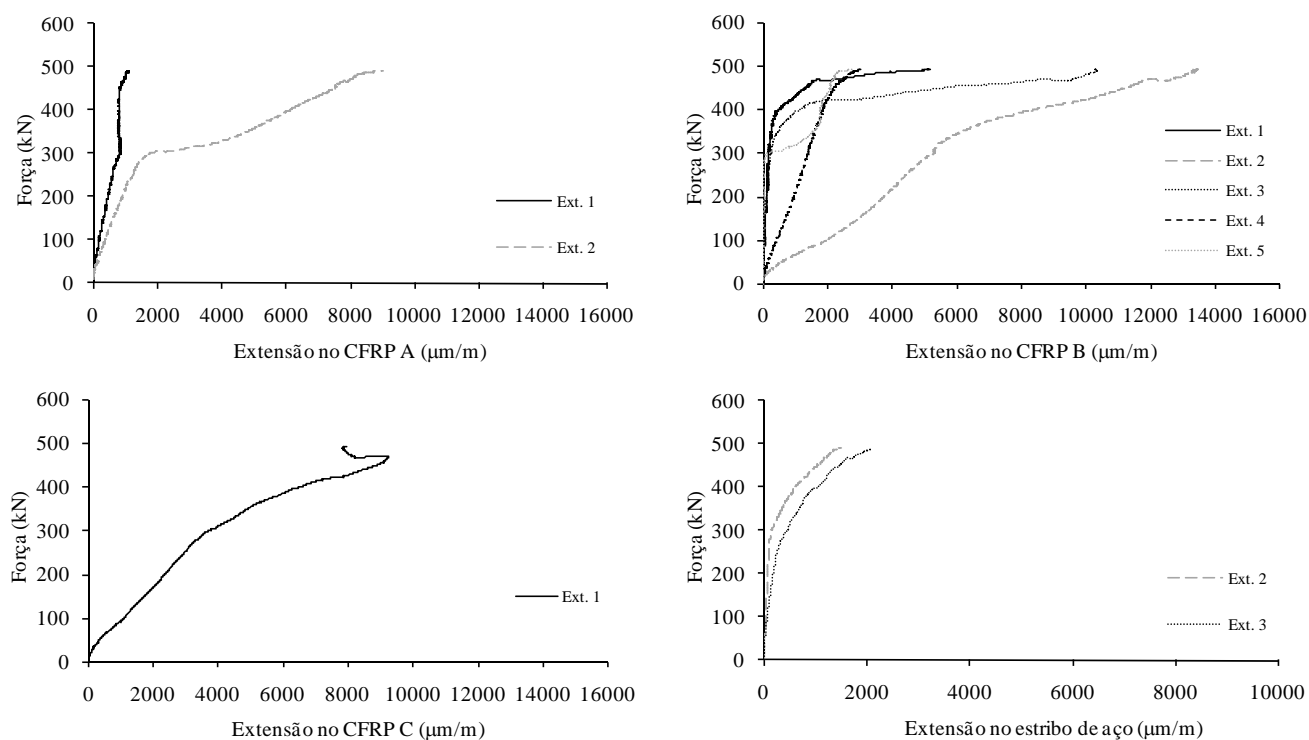


Figura C.103 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-5LI45F2-D.

4.12 Viga 5S-5LI60F-D

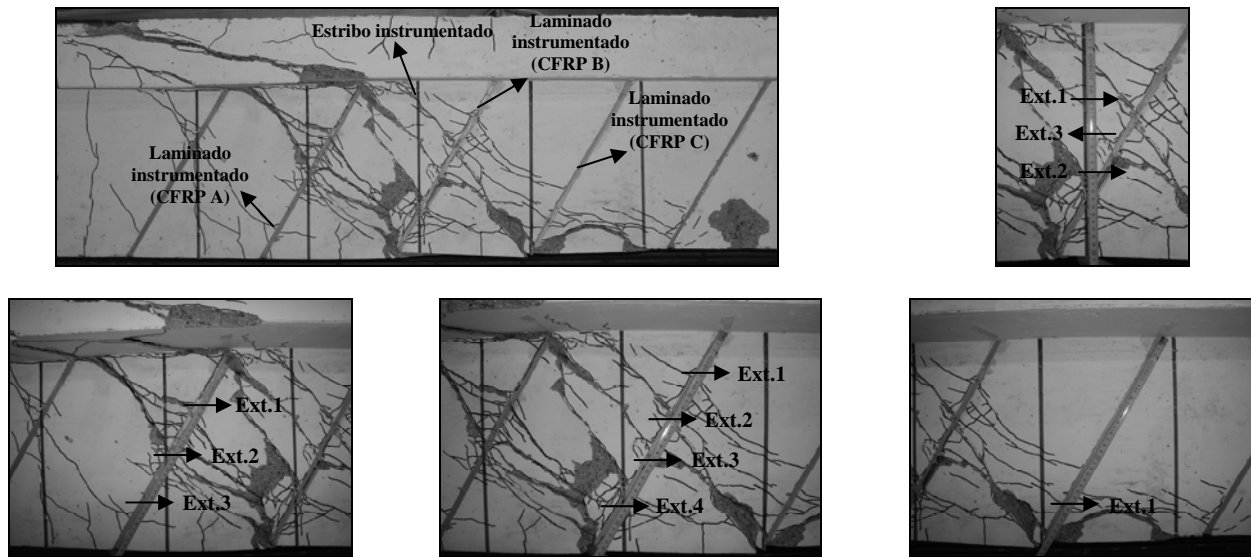


Figura C.104 - Localização dos extensômetros no laminado e estribo instrumentados da viga 5S-5LI60F-D.

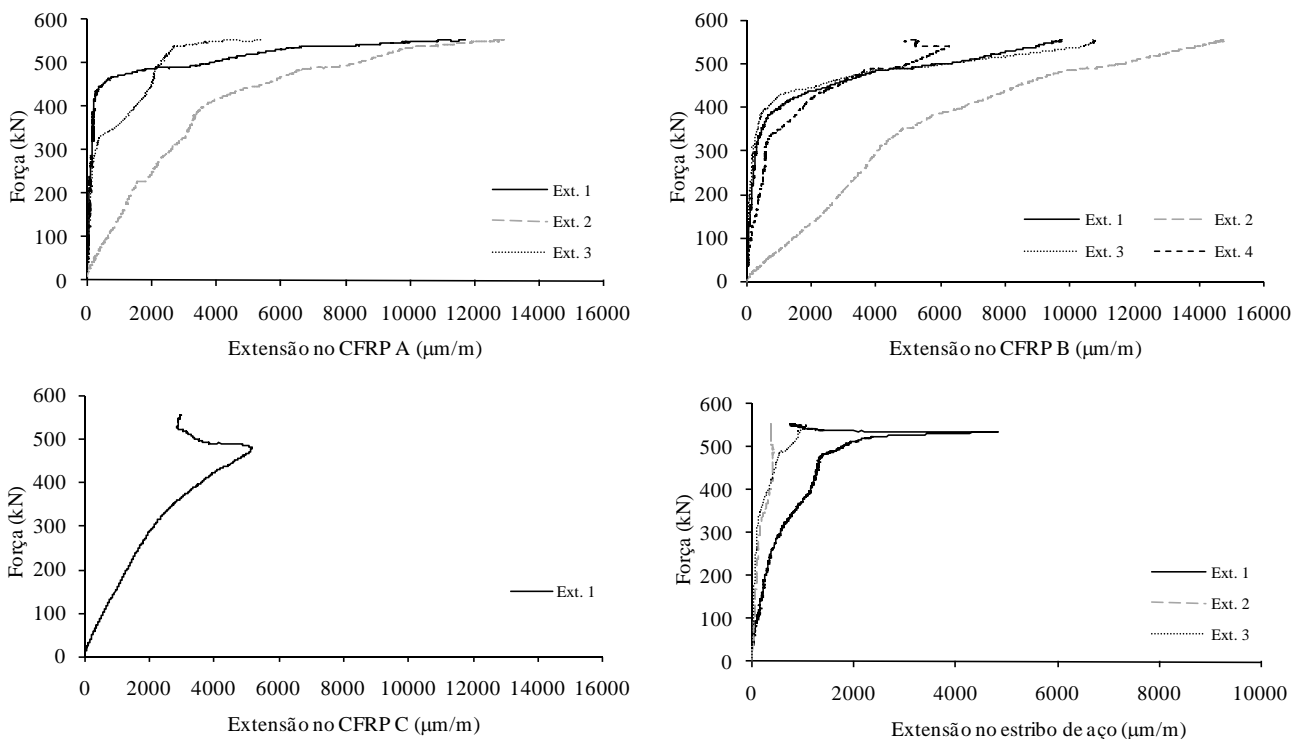


Figura C.105 - Comportamento dos laminados e estribo de aço instrumentados da viga 3S-5LI60F-D.

ANEXO D - Sequência do ensaio de algumas das vigas do programa experimental do Capítulo 4

Neste anexo apresenta-se a sequência do ensaio de algumas das vigas do programa experimental apresentado no Capítulo 4.

1. Vigas da série B

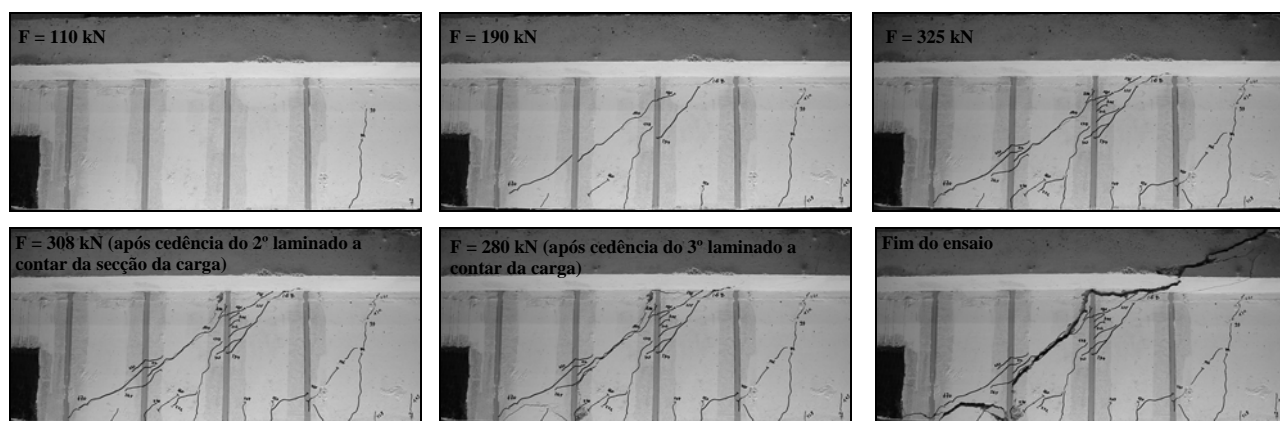


Figura D.1 - Sequência do ensaio da viga 2S-4LV-B (carga máxima = 337.4 kN).

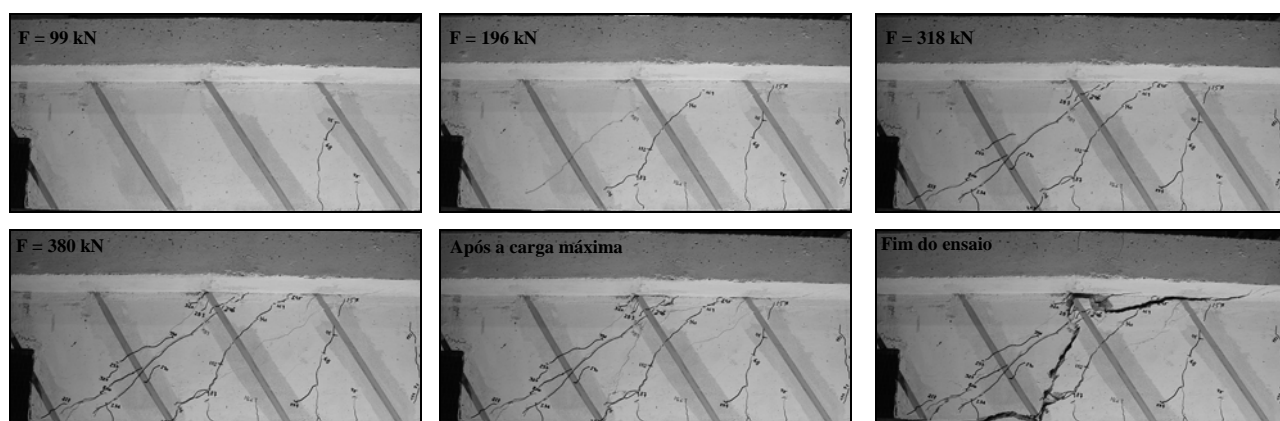


Figura D.2 - Sequência do ensaio da viga 2S-4LI60-B (carga máxima = 386.4 kN).

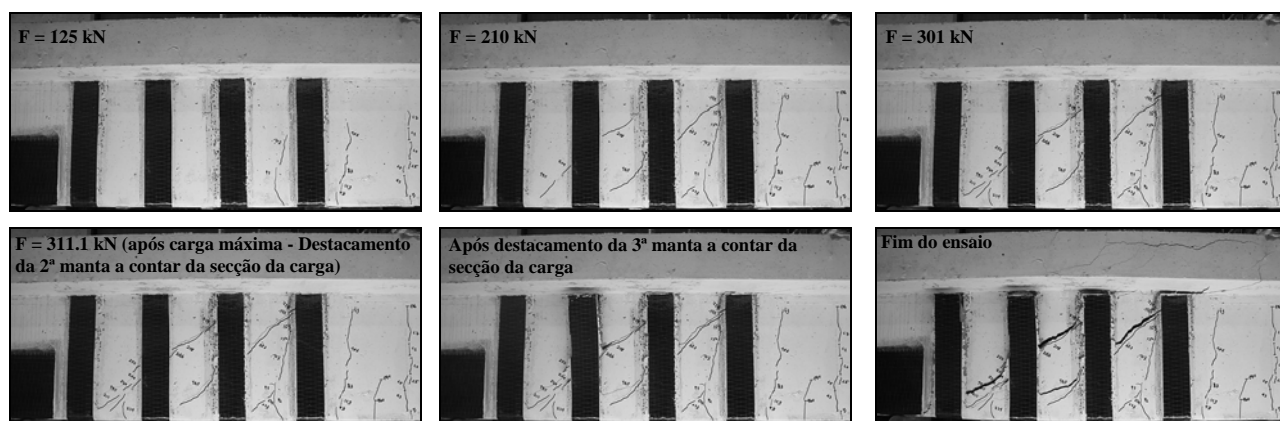


Figura D.3 - Sequência do ensaio da viga 2S-4M-B (carga máxima = 311.1 kN).

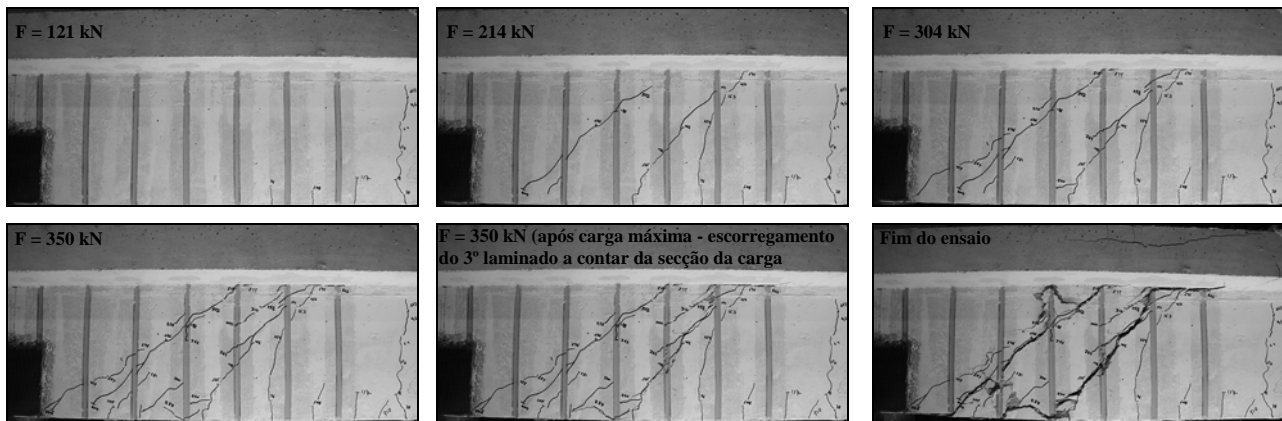


Figura D.4 - Sequência do ensaio da viga 2S-7LV-B (carga máxima = 374.1 kN).

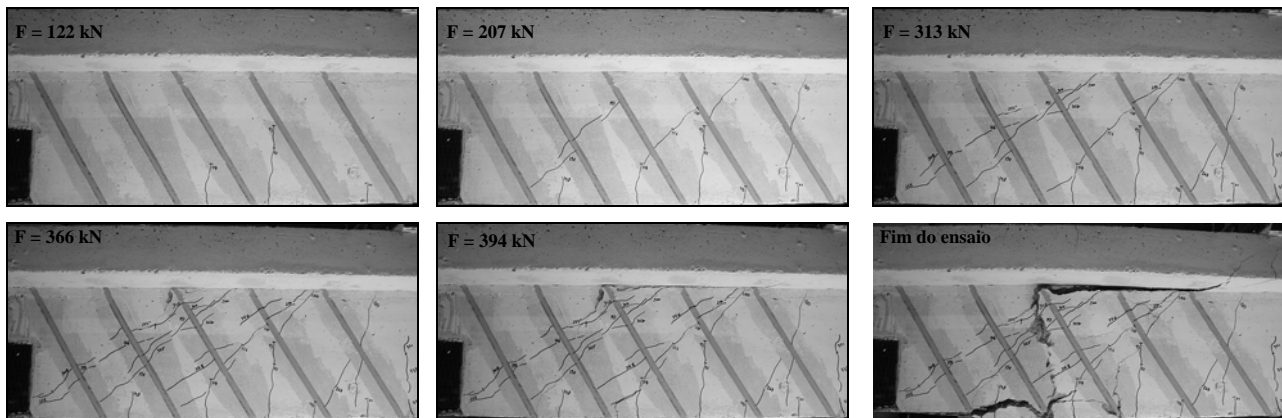


Figura D.5 - Sequência do ensaio da viga 2S-6LI60-B (carga máxima = 394.4 kN).

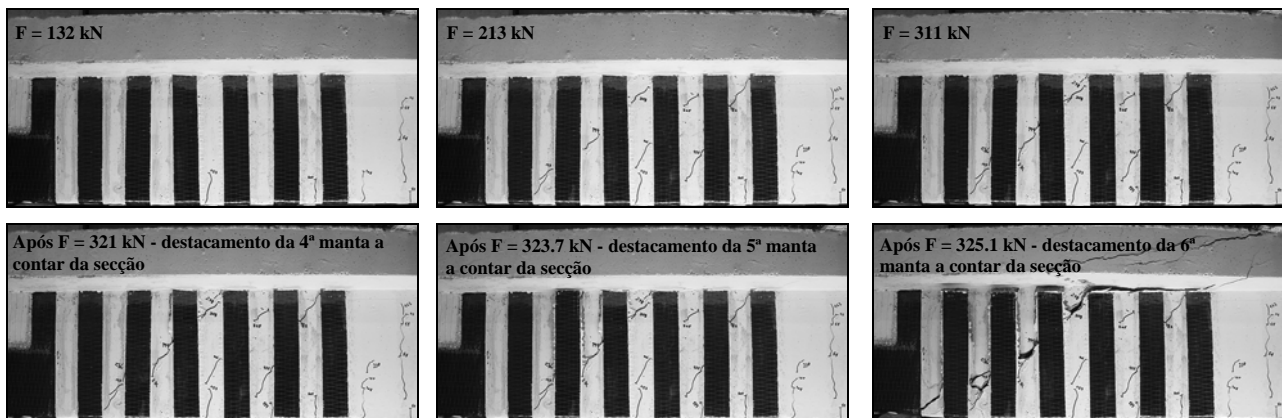


Figura D.6 - Sequência do ensaio da viga 2S-7M(1)-B (carga máxima = 325.1 kN).

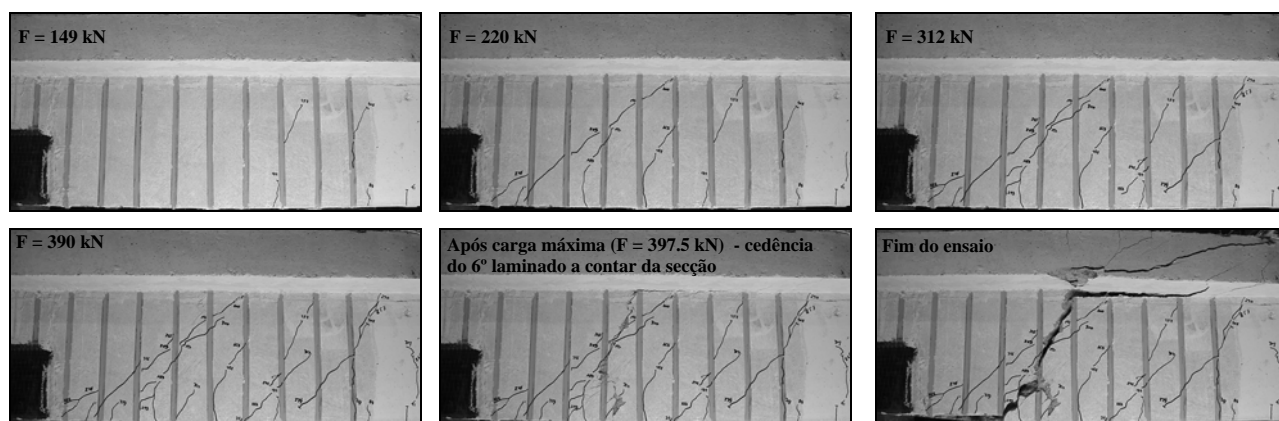


Figura D.7 - Sequência do ensaio da viga 2S-10LV-B (carga máxima = 397.5 kN).

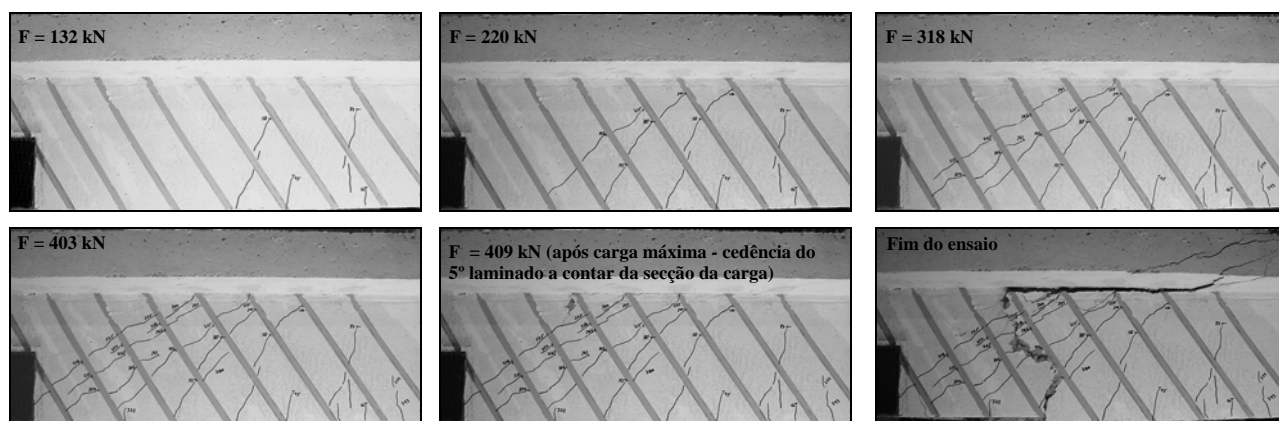


Figura D.8 - Sequência do ensaio da viga 2S-9LI60-B (carga máxima = 412.7 kN).

2. Vigas da série C

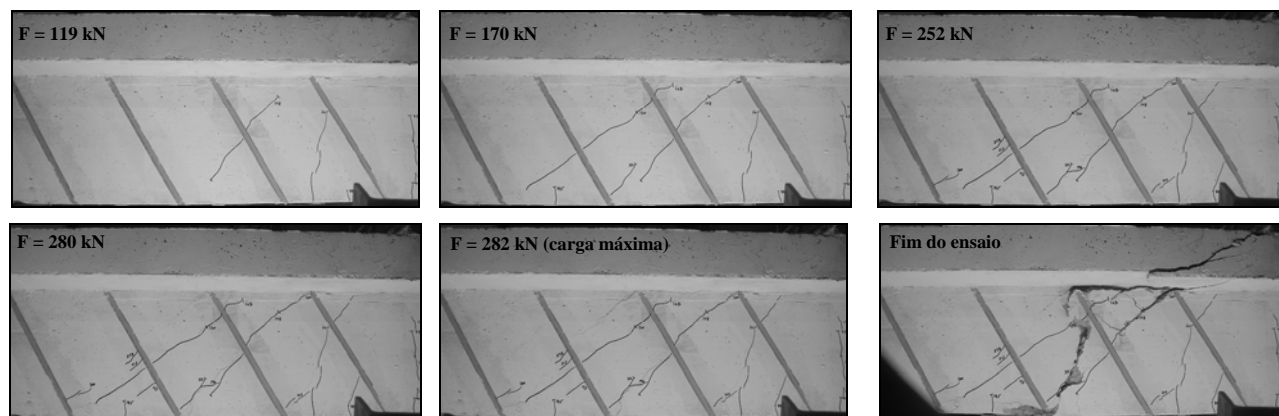


Figura D.9 - Sequência do ensaio da viga 2S-4LI60-C (carga máxima = 281.6 kN).

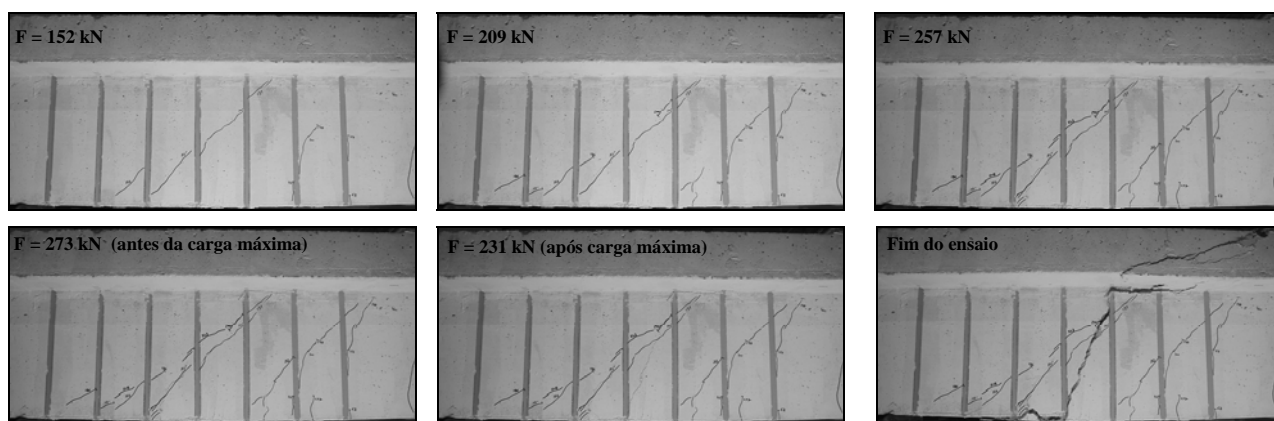


Figura D.10 - Sequência do ensaio da viga 2S-7LV-C (carga máxima = 273.7 kN).

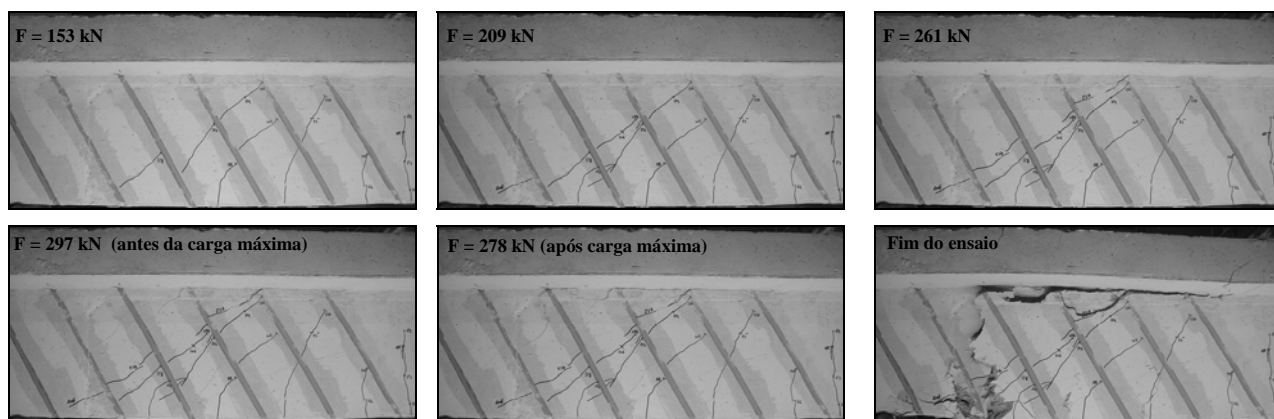


Figura D.11 - Sequência do ensaio da viga 2S-6LI60-C (carga máxima = 297.7 kN).

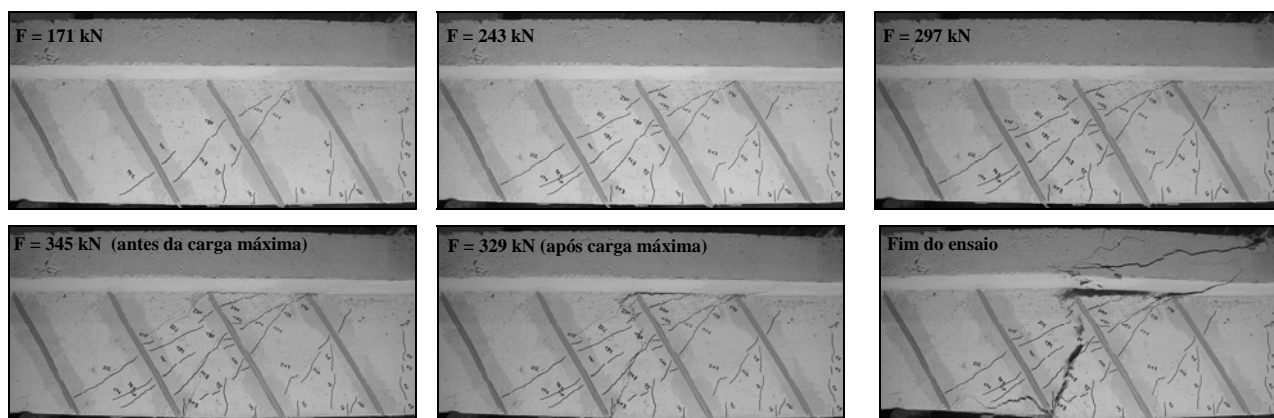


Figura D.12 - Sequência do ensaio da viga 4S-4LI60-C (carga máxima = 345.6 kN).

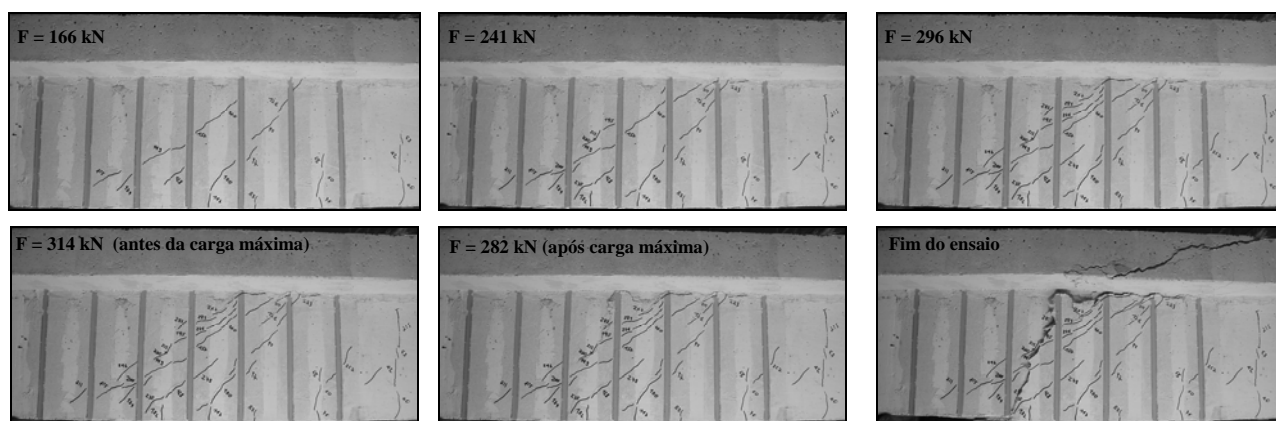


Figura D.13 - Sequência do ensaio da viga 4S-7LV-C (carga máxima = 315.2 kN).

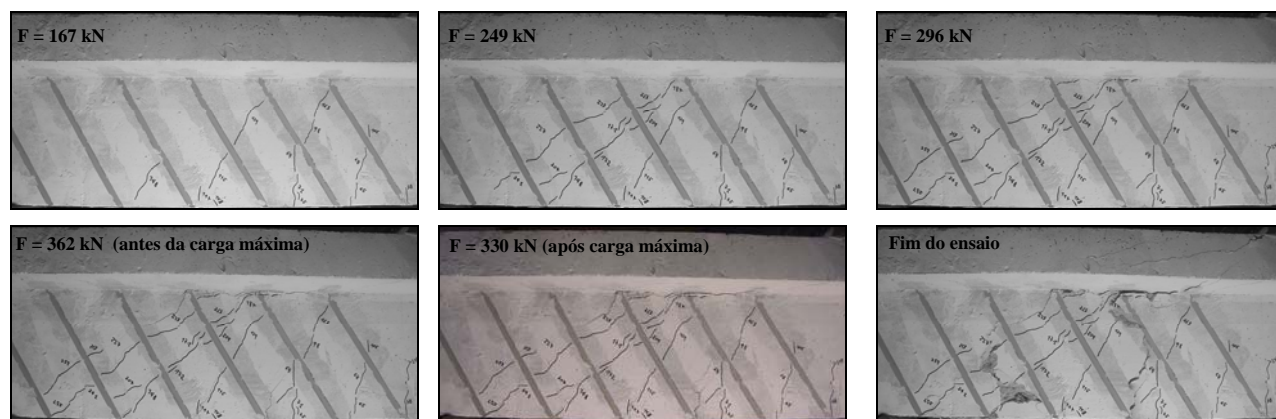


Figura D.14 - Sequência do ensaio da viga 4S-6LI60-C (carga máxima = 362.3 kN).

3. Vigas da série D

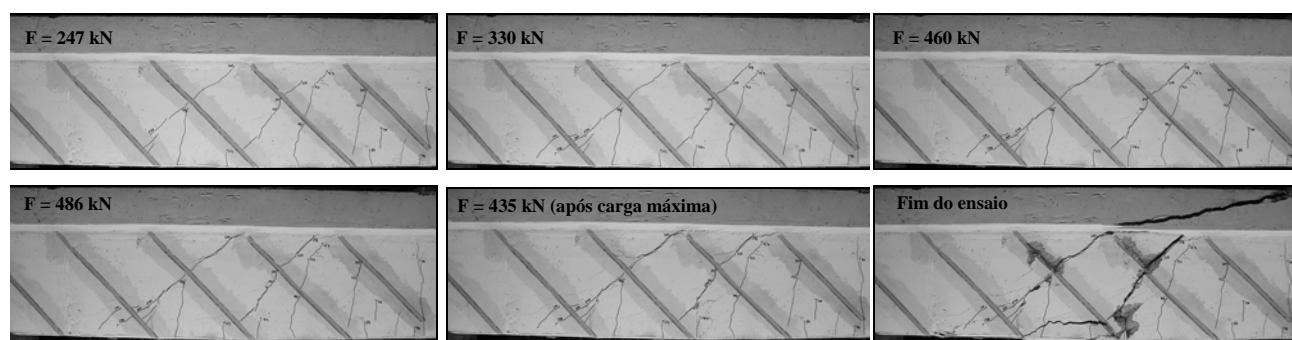


Figura D.15 - Sequência do ensaio da viga 3S-5LI45-D (carga máxima = 492.1 kN).

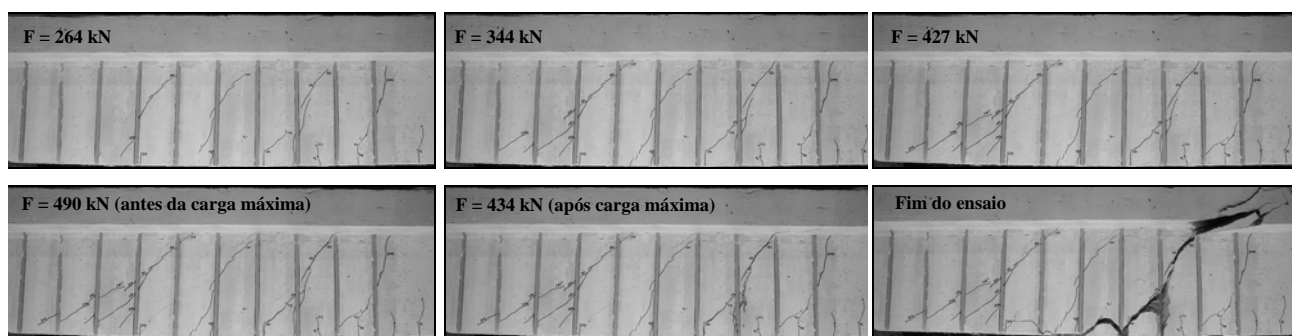


Figura D.16 - Sequência do ensaio da viga 3S-10LV-D (carga máxima = 491.7 kN).

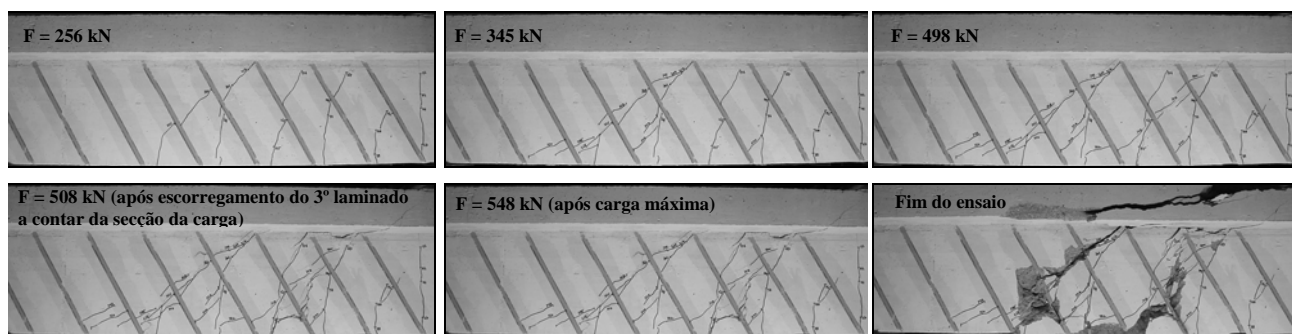


Figura D.17 - Sequência do ensaio da viga 3S-8LI60-D (carga máxima = 584.5 kN).

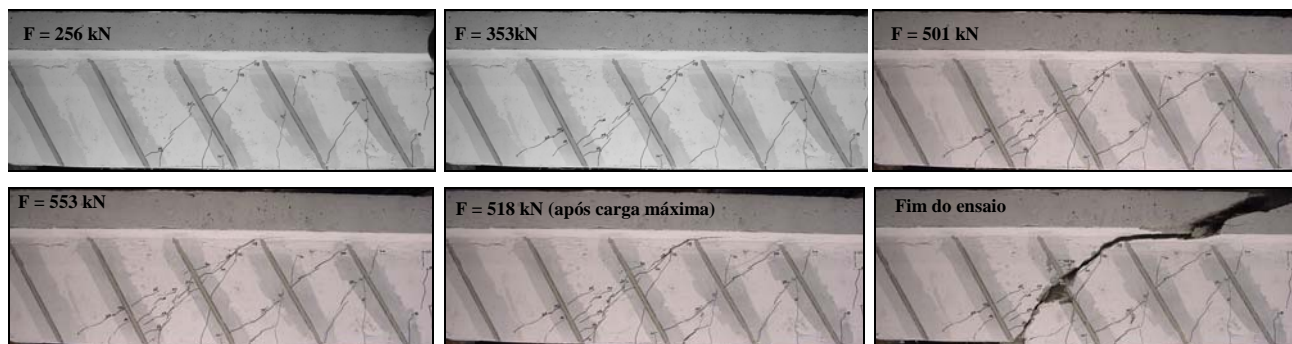


Figura D.18 - Sequência do ensaio da viga 5S-5LI60-D (carga máxima = 556.4 kN).